

Аграрная наука Евро-Северо-Востока

AGRICULTURAL SCIENCE EURO-NORTH-EAST

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



Том 25
№ 3
2024

Vol. 25
No. 3
2024

© Учредитель журнала – Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого»
(ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока) 610007, г. Киров, ул. Ленина, 166а

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

Регистрационный номер
ПИ №ФС77-72290
от 01.02.2018 г.

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

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

Рубрики журнала:

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

Контент доступен
под лицензией Creative
Commons Attribution 4.0
License



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, директор 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, 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 ФГБУН «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 ФГБУН «Удмуртский ФИЦ УрО РАН», г. Ижевск, Россия
Никонова Галина Николаевна	д.э.н., профессор, чл.-корр. РАН, главный научный сотрудник, руководитель отдела прогнозирования трансформации экономических структур и земельных отношений Института аграрной экономики и развития сельских территорий – структурного подразделения ФГБУН «Санкт-Петербургский ФИЦ РАН», г. Санкт-Петербург, Россия
Пашкина Юлия Викторовна	д.в.н., профессор, и.о. зав. кафедрой эпизоотологии, паразитологии и ветеринарно-санитарной экспертизы ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный агротехнологический университет», г. Нижний Новгород, Россия

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

Журнал включен в базы данных
РИНЦ, 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.cnsnb.ru/elbib.shtm>;
CYBERLENINKA:
<https://cyberleninka.ru/>;
журнала:
<http://www.agronauka-sv.ru>

Оформить подписку можно на
сайте "Объединенного каталога
"Пресса России" www.ppressa-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
фото А. А. Широких

Подписано к печати
14.06.2024

Дата выхода в свет
30.06.2024

Формат 60x84^{1/8}.

Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 23,95.

Тираж 100 экз. Заказ 14.
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

Пой
Юрий Алексеевич

Широких
Ирина Геннадьевна

Щенникова
Ирина Николаевна

Changzhong Ren

Ivanovs Semjons

Marczuk Andrzej

Náhlík András

Poutanen Kaisa

Romaniuk Wazlaw

Yu Li

Алешкин Алексей
Владимирович

Артемов 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 Новго-
род, 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.т.н., профессор, чл.-корр. РАН, главный научный сотрудник ФГБНУ
«Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», г. Москва, Россия

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, Технолог-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, зав. лабораторией координатного
земледелия, зам. директора по научной работе, Мордовский НИИ сельского
хозяйства – филиал ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-
Востока имени Н. В. Рудницкого», г. Саранск, Республика Мордовия, 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 сотру-
дник лаборатории зерно- и семяочистительных машин ФГБНУ ФАНЦ Се-
веро-Востока, г. Киров, Россия

д.б.н., профессор, зав. отделом экологии и ресурсоедения 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 государствен-
ная 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, Director of 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, Acting Head of the Department of Tractors and Automobiles, Russian Timiryazev State Agrarian University, Moscow, Russia

Igor A. Domskiy Dr. of Sci. (Veterinary), professor, corresponding member of RAS, Director at Professor Zhitkov Russian Research Institute of Game Management and Fur Farming, Kirov, Russia

Sergey P. Eremin Dr. of Sci. (Veterinary), professor, Head of the Department of Small Animal Science, Breeding of Farm Animals and Obstetrics of Nizhny Novgorod State Agrotechnological University, Nizhny Novgorod, Russia

Dmitriy A. Ivanov Dr. of Sci. (Agricultural), professor, corresponding member of RAS, chief researcher of the All-Russian Institute of Reclaimed Lands – Branch of the Federal Research Centre V. V. Dokuchaev Soil Science Institute, Tver, Russia

Petr P. Kazakevich Dr. of Sci. (Engineering), the professor, corresponding member of Belarus NAS, Deputy Chairman of Presidium of Belarus NAS, a foreign member of RAS, Minsk, Republic of Belarus

Vladimir M. Kosolapov Dr. of Sci. (Agricultural), the professor, academician of RAS, the Academic advisor of the Federal Williams Research Center of Forage Production and Agroecology, Moscow, Russia

Aleksandr I. Kostjaev Dr. of Sci. (Economics), professor, academician of RAS, chief researcher, Chief of the Department of Economic and Social Problems of the Development of Regional Agro-Industrial Complex and Rural Territories the Institute of Agricultural Economics and Rural Development, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

Ivan M. Kulikov Dr. of Sci. (Economics) professor, academician of RAS, Director of the Federal Horticultural Center for Breeding, Agrotechnology and Nursery, Moscow, Russia

Andrei V. Lednev Dr. of Sci. (Agricultural), associate professor, head of Udmurt Research Institute of Agriculture – Branch of the Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Izhevsk, Russia

Galina N. Nikonova Dr. of Sci. (Economics), professor, corresponding member of RAS, chief researcher, Chief of the Department of Forecasting Changes in Economic Structures and Land Relations of the Institute of Agricultural Economics and Rural Development, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

Yulia V. Pashkina Dr. of Sci. (Veterinary), professor, the acting head at the Department of Epizootology, Parasitology and Veterinary-Sanitary Inspection of Nizhny Novgorod State Agrotechnological University, Nizhny Novgorod, Russia

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

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

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

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

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

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

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

www.agronauka-sv.ru

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

Technical edition, layout
Irina V. Kodochigova

Cover layout
Natalia N. Soboleva

On the first page of the cover
photo A. A. Shirokikh

Passed for printing
14.06.2024

Date of publication
30.06.2024

Format 60x84^{1/8}. Offset paper.
Cond. pecs. l. 23.95.

Circulation 100 copies. Order 14.
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. Sisyagin	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
Yuriy A. Tsoy	Dr. of Sci. (Engineering), the professor, corresponding member of RAS, chief researcher of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia
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, head coordinate farming laboratory, principal director of scientific research, Mordovia Research Agricultural Institute – branch of Federal Agrarian Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky, Saransk, Republic of Mordovia, 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

Ю.Д. Смирнова, Е.А. Подолян

Приемы повышения эффективности микроклонального размножения картофеля (обзор)..... 319

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

РАСТЕНИЕВОДСТВО

М. А. Фесенко, А. М. Шпанев

Влияние агротехнологических факторов на урожайность ярового ячменя в условиях Ленинградской области..... 330

Л. В. Волкова, О. С. Амунова

Наследование основных элементов продуктивности и параметров адаптивности у диаллельных гибридов яровой мягкой пшеницы..... 340

Е. Г. Арзамасова, Е. В. Попова, О. Л. Онучина, И. В. Шихова

Перспективная сортопопуляция клевера лугового для северного земледелия..... 355

Т. А. Базанов, И. В. Ущаповский, Н. Н. Логинова, Е. В. Минина, П. Д. Вересова

Изучение экспрессии генов целлюлозосинтаз у льна в процессе роста..... 368

О. Д. Голяева

Оценка сортов смородины красной по продуктивности и товарным качествам..... 379

И. В. Бакулова, И. И. Плужникова, Н. В. Криушин

Элементы сортовой технологии возделывания нового сорта конопли посевной Людмила..... 388

ЗАЩИТА РАСТЕНИЙ

З. П. Котова, Т. А. Данилова, Л. Г. Данилов, М. В. Архипов

Перспективы применения различных видов и штаммов симбиотических бактерий (*Xenorhabdus sp.*) в биологической защите картофеля от болезней в условиях Европейского Севера России..... 395

В. В. Смур

Многолетняя динамика численности и сезонное развитие колорадского жука на посадках картофеля в Ленинградской области в условиях потепления климата..... 407

ХРАНЕНИЕ И ПЕРЕРАБОТКА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ

Г. А. Дорн, Е. Ю. Лобач, Ю. Г. Гурьянов, Б. Тохирйён, В. М. Позняковский

Экспериментальные исследования безопасности пантогематогена в качестве функционального ингредиента специализированных продуктов: аллергенные и иммунотоксические свойства..... 415

ЗЕМЛЕДЕЛИЕ, АГРОХИМИЯ, МЕЛИОРАЦИЯ

Л. Н. Прокина, С. В. Пугаев

Влияние минеральных удобрений на продуктивность многолетних трав в длительном стационарном опыте.... 425

О. В. Балун

Экологические режимы мелиорированных земель в Новгородской области..... 435

КОРМОПРОИЗВОДСТВО: ПОЛЕВОЕ И ЛУГОВОЕ

Н. А. Ковтунова, В. В. Ковтунов, А. Е. Романюкин, Е. А. Шишова, Н. С. Кравченко

Динамика содержания сухого вещества и протеина в зеленой массе суданской травы в зависимости от способа посева..... 444

ЗООТЕХНИЯ

А. Ю. Криворучко, А. А. Каниболоцкая, Л. Н. Скорых, О. Н. Криворучко

Использование таргетного секвенирования для генотипирования овец породы джалгинский меринос..... 453

В. М. Кузнецов

Анализ показателей разнообразия STR-локусов в выборках производителей красной скандинавской и голштинской пород..... 465

МЕХАНИЗАЦИЯ, ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ, АВТОМАТИЗАЦИЯ

И. А. Старостин, С. А. Давыдова, А. В. Ещин, Т. З. Годжаев

Оценка производительности беспилотных машинно-тракторных агрегатов..... 483

В. В. Голубовский, Н. А. Симанин, В. В. Коновалов

Статическая характеристика измерительного преобразователя угловой скорости для адаптивных систем управления гидравлическими приводами..... 495

А. Ю. Брюханов, Е. В. Шалавина, Э. В. Васильев

Прогнозное распределение технологий переработки навоза КРС в Российской Федерации..... 507

ХРОНИКА

Памяти ученого. Цой Юрий Алексеевич..... 518

CONTENTS

REVIEWS

Yulia D. Smirnova, Elena A. Podolian

Techniques for increasing the efficiency of microclonal propagation of potatoes (review)..... 319

ORIGINAL SCIENTIFIC ARTICLES

PLANT GROWING

Maria A. Fesenko, Alexander M. Shpanev

The influence of agrotechnological factors on the yield of spring barley in the conditions of the Leningrad region..... 330

Lyudmila V. Volkova, Oksana S. Amunova

Inheritance of the main elements of productivity and adaptability parameters in diallelic hybrids of spring soft wheat..... 340

Ekaterina G. Arzamasova, Eugenia V. Popova, Olga L. Onuchina, Irina V. Shihova

A promising variety population of meadow clover for northern agriculture 355

Taras A. Bazanov, Igor V. Ushapovsky, Natalya N. Loginova, Ekaterina V. Minina, Polina D. Veresova

Study of the expression of cellulose synthase genes during plant growth of flax..... 368

Olga D. Golyaeva

Evaluation of red currant varieties according to productivity and marketability..... 379

Irina V. Bakulova, Irina I. Pluzhnikova, Nikolay V. Kriushin

Elements of varietal technology of cultivation of a new cannabis sativa variety ‘Lyudmila’..... 388

PLANT PROTECTION

Zinaida P. Kotova, Tatyana A. Danilova, Leonid G. Danilov, Mikhail V. Arkhipov

Prospects for the use of various species and strains of symbiotic bacteria (*Xenorhabdus* sp.) in the biological protection of potatoes from diseases in the European North of Russia..... 395

Vasilij V. Smuk

Long-term population dynamics and seasonal development of the Colorado potato beetle on potato plantings in the Leningrad region under conditions of climate warming..... 407

STORAGE AND PROCESSING OF AGRICULTURAL PRODUCTION

Galina A. Dorn, Evgenia Y. Lobach, Yuri G. Guryanov, Boisjoni Tohiriyon, Valery M. Poznyakovsky

Experimental studies of the safety of pantothenic acid as a functional ingredient in specialized products: allergenic and immunotoxic properties..... 415

AGRICULTURE, AGROCHEMISTRY, LAND IMPROVEMENT

Lyudmila N. Prokina, Sergey V. Pugaev

The effect of mineral fertilizers on the productivity of perennial grasses in a long-term stationary experiment..... 425

Olga V. Balun

Ecological regimes of reclaimed lands in the Novgorod region..... 435

FODDER PRODUCTION: FIELD AND MEADOW

Natalia A. Kovtunova, Vladimir V. Kovtunov, Aleksandr E. Romanyukin, Elena A. Shishova,

Nina S. Kravchenko

Dynamics of dry matter content and protein percentage in green mass of Sudan grass depending on the sowing method..... 444

ZOOTECHNY

Alexander Yu. Krivoruchko, Anastasiya A. Kanibolotskaya, Larisa N. Skorykh, Olga N. Krivoruchko

The use of targeted sequencing for genotyping sheep of the Dzhalginsky Merino breed..... 453

Vasilij M. Kuznetsov

Analysis of the diversity of STR-loci in the samples of bulls of Red Scandinavian and Holstein breeds..... 465

MECHANIZATION, ELECTRIFICATION, AUTOMATION

Ivan A. Starostin, Svetlana A. Davydova, Aleksandr V. Eshchin, Teimur Z. Godzhaev

Performance evaluation of unmanned machine-tractor units..... 483

Vitaly V. Golubovsky, Nikolay A. Simanin, Vladimir V. Kononov

Static characteristic of angular velocity measuring transducer for adaptive control systems of hydraulic drives.... 495

Aleksandr Yu. Briukhanov, Ekaterina V. Shalavina, Eduard V. Vasilev

Forecast distribution of cattle manure processing technologies in the Russian Federation..... 507

CHRONICLE

In memory of the scientist. Tsoi Yuri Alekseevich..... 518

<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.3.319-329>

УДК 631.53:631.811:633.491



Приемы повышения эффективности микроклонального размножения картофеля (обзор)

© 2024. Ю.Д. Смирнова ✉, Е.А. Подолян

ФГБНУ Федеральный исследовательский центр «Почвенный институт им. В. В. Докучаева», г. Москва, Российская Федерация

Картофель (Solanum tuberosum L.) является важной сельскохозяйственной культурой, обеспечивающей продовольственную безопасность многих стран. Одним из главных факторов, способствующих получению высоких урожаев картофеля является использование качественного семенного материала. Применение метода культуры тканей для размножения растений картофеля является наиболее значимым. В работе проанализированы источники отечественной и зарубежной литературы, представляющие результаты исследований, связанных с изучением и совершенствованием приемов размножения in vitro и выращивания in vivo для получения исходного материала картофеля. Публикации выбраны из открытых источников за последние 10 лет. Рассмотрено влияние различных регуляторов роста (цитокины, ауксины, гибберелины, бензихол, этихол, гуминовые кислоты), минерального состава питательной среды Мурасиге-Скуга (MS), физических факторов на биомассу, длину побегов и корней, количество узлов и укоренение эксплантов в условиях in vitro. При этом оптимальные параметры могут варьировать в зависимости от сорта картофеля. Отдельно проанализированы факторы (изменение состава среды, физических показателей), оказывающие влияние на увеличение образования числа микроклубней в культуре in vitro. Данный метод получения оздоровленного материала является наиболее перспективным. Среди приёмов повышения адаптации пробирочных растений in vivo рассмотрены предварительное замачивание перед высаживанием в грунт пробирочных растений картофеля и прикорневая обработка гуминовыми препаратами, фитοиммунomodulators, а также различные варианты укрытия растений ex vitro. Показано, что размножение пробирочных растений на установках аэропонного и гидропонного типа позволяет минимизировать воздействие внешних факторов, в том числе попадание инфекционных заболеваний.

Ключевые слова: семеноводство картофеля, культура in vitro, адаптация in vivo, *Solanum tuberosum* L.

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ Федеральный исследовательский центр «Почвенный институт имени В. В. Докучаева» (тема № FGUR-2022-0007).

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Смирнова Ю. Д., Подолян Е. А. Приемы повышения эффективности микроклонального размножения картофеля (обзор). *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2024;25(3):319–329.

DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.3.319-329>

Поступила: 29.03.2024

Принята к публикации: 21.05.2024

Опубликована онлайн: 26.06.2024

Techniques for increasing the efficiency of microclonal propagation of potatoes (review)

© 2024. Yulia D. Smirnova ✉, Elena A. Podolian

Federal Research Center V. V. Dokuchaev Soil Institute, Moscow, Russian Federation

Potato (Solanum tuberosum L.) is an important crop that ensures food security in many countries. One of the main factors ensuring high potato yields is the use of high-quality seed material. The application of tissue culture method for propagation of potato plants is the most significant. The work analyzes sources of domestic and foreign literature, presenting the results of research related to the study and improvement of in vitro propagation and in vivo cultivation techniques for obtaining potato source material. Publications were selected from open sources over the past 10 years. The influence of various growth regulators (cytokines, auxins, gibberellins, benzichol, etihol, humic acids), the mineral composition of the Murashige-Skoog (MS) nutrient medium, and physical factors on biomass, the length of shoots and roots, the number of nodes and rooting of explants under in vitro conditions is considered. At the same time, the optimal parameters may vary depending on the potato variety. Factors (changes in the composition of the environment, physical indicators) that influence the increase in the formation of the number of microtubers in in vitro culture are considered separately. This method of obtaining healthy material is the most promising. Among the methods for increasing the adaptation of test tube plants in vivo, preliminary soaking before planting test tube potato plants in the soil and root treatment with humic preparations, phytoimmunomodulators, as well as various options for covering plants ex vitro are considered. It has been shown that the propagation of test tube plants in aeroponic and hydroponic installations allows minimizing the impact of external factors, including the introduction of infectious diseases.

Keywords: potato seed production, in vitro culture, in vivo adaptation, *Solanum tuberosum* L.

Acknowledgements: the research was carried out under the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of Federal Research Center V. V. Dokuchaev Soil Science Institute (theme No. FGUR-2022-0007).

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

Conflict of interest: the authors declare that there is no conflict of interest.

For citation: Smirnova Yu. D., Podolian E. A. Techniques for improving the efficiency of potato microclonal propagation (review). *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2024;25(3):319–329. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.3.319-329>

Received: 29.03.2024

Accepted for publication: 21.05.2024

Published online: 26.06.2024

Картофель (*Solanum tuberosum* L.) широко распространен во всем мире в качестве продовольственной культуры в связи с высокой питательной ценностью и урожайностью, а также несложной агротехникой его выращивания. В планетарном масштабе картофель занимает по значимости четвертое место среди сельскохозяйственных культур после пшеницы, риса, кукурузы и составляет большую долю в рационе людей во всем мире [1]. Картофельные клубни насыщены органическими веществами, витамином С, минералами и особенно богаты калием [2].

По данным FAOSTAT¹, на 2022 год в 155 государствах занимаются возделыванием картофеля, под выращивание которого используется 23,5 млн га земли, урожайность его в среднем составляет 21,0 т/га, максимальная получена в Новой Зеландии – 50,8 т/га, минимальная 0,65 т/га – в Эритрее (Восточная Африка), в Российской Федерации – 17,4 т/га [3]. Площади возделывания картофеля на территории России с каждым годом сокращаются, что связано с невысокой средней урожайностью культуры по стране и, как следствие, низкой рентабельностью её выращивания. Высокая урожайность любой культуры обусловлена почвенно-климатическими условиями региона, интенсификацией возделывания и состоянием посадочного материала.

Отсутствие качественного семенного материала является главным фактором, определяющим низкую урожайность картофеля не только в нашей стране, но и в других странах мира [4, 5]. Большинство фермеров России в настоящее время используют на семена клубни, оставшиеся от предыдущего урожая, что приводит к постепенному снижению их качества. Еще одна причина, влияющая на качество семян картофеля – отсутствие семенного материала российской селекции. В основном

в хозяйствах распространены семена немецкой, голландской и белорусской селекции, что значительно сказывается на их стоимости и доступности.

В рамках Федеральной научно-технической программы развития сельского хозяйства на 2017–2025 гг. постановлением Правительства России от 5 мая 2018 г. № 559 утверждена подпрограмма «Развитие селекции и семеноводства картофеля в Российской Федерации»². Подпрограмма реализуется в целях стабильного роста объемов производства и использования высококачественного семенного картофеля современных конкурентоспособных отечественных сортов за счет применения новых высокотехнологичных российских разработок и осуществления комплексных научно-технических проектов полного инновационного цикла. За время выполнения подпрограммы создано 38 новых отечественных сортов картофеля, произведено 36,4 тыс. т элитного семенного материала отечественной селекции, разработано и зарегистрировано 3 новых биологических средства защиты картофеля. Доля произведенного элитного семенного картофеля отечественной селекции в общем объеме внутреннего потребления достигла 18 %.

Вегетативное размножение клубнями является наиболее распространенным путём тиражирования в семеноводстве картофеля. Однако данный метод имеет свои недостатки: низкий уровень размножения и высокий риск передачи различных заболеваний. Одним из способов решения этой проблемы является применение для размножения растений картофеля методов культуры тканей. Микроклональное размножение выступает перспективной альтернативой традиционным методам получения семенного картофеля в больших масштабах и за короткое время. Кроме того, полученные

¹Food and agriculture organization of the United Nations. Data. Agricultural crops. Potato. FAOSTAT. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL> (дата обращения: 01.03.2024).

²Подпрограмма «Развитие селекции и семеноводства картофеля в Российской Федерации». ФГБУ «Центр Агроаналитики». [Электронный ресурс]. URL: <https://specagro.ru/fntp/subprograms/potatoes> (дата обращения: 12.02.2024).

семена в этом случае свободны от заболеваний, вызванных вирусами, грибами и бактериями [6]. Опубликованы научные обзоры по модернизации, описанию процессов и ново-

введений на различных стадиях клонального микроразмножения картофеля [7, 8].

В целом процесс клонального микроразмножения можно разделить на 4 этапа (рис.).



Рис. Этапы микроклонального размножения /
Fig. Stages of microclonal reproduction

Цель исследования – обзор российской и зарубежной научной литературы, описывающей приемы размножения *in vitro* и выращивания *in vivo* при получении исходного материала картофеля.

Материал и методы. Изучено 43 научных публикации отечественных и зарубежных авторов, посвященных исследованиям выращивания исходного материала картофеля, в том числе микроклонального размножения на разных питательных средах, опытам по адаптации микрорастений при дальнейшем выращивании и получению миниклубней. Поиск научных статей осуществляли путем мониторинга электронных библиотечных систем: e-Library.Ru, Springer, Cyberleninka, Crossfer, ZNANIUM, ScienceDirect. Производили поиск с использованием следующих ключевых слов: выращивание картофеля; микроклональное размножение картофеля; модернизация сред для микроклонального размножения картофеля; стиму-

ляторы роста и гуминовые препараты в микроклональном размножении; применение гидропоники и аэропоники при микроклональном размножении картофеля. Рассматривали исследования, проведенные за последние 10 лет.

Основная часть. Размножение микроклонов *in vitro*. Одним из факторов, определяющих успех в размножении картофеля *in vitro*, является питательная среда. Решающее значение для стимуляции и размножения микрорастений картофеля имеет использование соответствующих питательных сред, выбор правильного типа и концентрации регуляторов роста, витаминов, микроэлементов и других питательных веществ для растений. Поиском и модернизацией состава питательных сред для индукции и размножения побегов картофеля занимаются исследователи по всему миру [6, 7, 8].

Наиболее простой и часто применяемый способ влияния на развитие микрорастений картофеля – введение в стандартную питатель-

ную среду Мурасиге-Скуга (MS) на этапе размножения *in vitro* регуляторов роста (ауксинов, цитокининов и гиббереллиновой кислоты и др.).

Цитокинины представляют собой гормоны, стимулирующие рост растений, участвующие в поддержании меристематических клеток, формировании побегов и развитии сосудистой сети. Полученные результаты исследований подтверждают стимулирующую или ингибирующую функцию цитокининов в процессах развития растений, таких как рост и ветвление корней, контроль апикального доминирования в побеге, развитие хлоропластов и старение листьев [9, 10, 11].

В лаборатории культур растительных тканей Politeknik Negeri Lampung (Индонезия) проводила исследования по использованию регуляторов роста цитокининовой природы (безиладенин (BA) и изопентениладенин (2-iP)) при выращивании микрорастений картофеля сорта Atlantic на среде MS. Отмечено статистически значимое увеличение длины побегов, числа листьев и количества корней в вариантах с 0,5 мг/л 2-iP и 1 мг/л BA, большие концентрации значительно снижали корнеобразование и замедляли рост побегов [5]. В целом сами цитокинины не влияют на процесс корнеобразования и количество корней, однако под их воздействием в растении вырабатываются эндогенные ауксины, которые затем транспортируются к основанию стебля, где образуются корни [5]. Ауксин – основной растительный гормон, участвующий в различных процессах развития. Помимо биосинтеза и деградации, важным процессом, определяющим пространственное распределение ауксина, является его полярный транспорт и направленный транспорт от клетки к клетке [12]. Наблюдениями других исследователей [5, 13] по включению этих же регуляторов роста в культуральную среду MS получены схожие результаты и положительные отклики растений по сравнению со средой без цитокининов.

Сочетание ауксинов с гибберелинами значительно повышает эффективность микроклонального размножения: ускоряется развитие корневой системы, увеличивается биомасса, формируется материал для черенкования с повышенной приживаемостью [14]. Для определения оптимальных концентраций и соотношения указанных фиторегуляторов были проведены исследования с различными сочетаниями содержания индолилуксусной кислоты (ИУК) и гиббереллиновой кислоты (ГКЗ) в среде MS. Наилучшая комбинация включала 1 мг/л ИУК

и 2 мг/л ГКЗ, при которой достигался максимальный коэффициент размножения и оптимальная длина микрорастений картофеля [15].

Стресспротекторы-фиторегуляторы бензихол и этихол, разработанные Институтом физиологически активных веществ РАН, являются новой группой регуляторов роста и развития растений [16], которые способствуют усилению процессов защиты от внутриклеточного окислительного стресса. При размножении *in vitro* картофеля сортов Жуковский и Ипатовский результаты 3-летних экспериментов с применением данных фиторегуляторов показали, что наиболее эффективное действие на количество узлов и ризогенез оказывает бензихол в дозах 10^{-7} и 10^{-11} М. При этом этихол в дозе 10^{-11} М хорошо зарекомендовал себя при укоренении эксплантов.

Добавление в среду MS биологического препарата Рибав-Экстра (действующие вещества – аминокислота L-аланин (0,00152 г/л) и L-глутаминовая кислота (0,00196 г/л) в дозе 0,05-0,10 мл/л) благоприятно воздействовало на микроразмножение растений картофеля – увеличивалась высота растений на 10,6–22,7 %, возрастало количество междоузлий на 9,5–23,8 % и усиливался рост корневой системы на 17,2–41,4 % [17].

Исследованиями установлено, что минеральные вещества играют важную роль в морфогенезе растений картофеля *in vitro* [18, 19, 20]. Так, в опытах по выращиванию культуры картофеля на среде MS при различных уровнях концентрации компонентов среды ($\text{CaCl}_2 \times 2\text{H}_2\text{O}$, MgSO_4 , KH_2PO_4) побеги достигли значительного увеличения при двойных дозах ($2,0 \times \text{MS}$) данных соединений [21, 22]. Наблюдалась разница в поглощении ионов микрорастениями при повышении концентраций изучаемых веществ. Поглощение кальция проростками увеличилось в улучшенной среде в 1,5 раза по сравнению со стандартной прописью среды MS. Также отмечалось увеличение поглощения фосфора, магния и железа по сравнению с контрольной средой [22].

Изучение уровня NPK в составе среды MS показало, что более высокие уровни содержания данных элементов (N = 1418 мг/л, P = 115 мг/л, K = 1518 мг/л) по сравнению со стандартной прописью усиливают размножение *in vitro* [23]. Оптимальные уровни NPK могут варьировать в зависимости от сорта.

Исследованиями подтверждено положительное влияние гуминовых веществ на биометрические параметры растений *in vitro* [24].

Введение в модифицируемую среду MS (содержит органические компоненты ИМК 1 мг/л, гидролизат казеина 100 мг/л, сахарозу 20 г/л, витамины С, В1, В6, РР) 1,0–1,5 мг/л маточного раствора гидрогумата (10%-ный в. р.), способствовало увеличению массы культуральных растений в два раза и оказывало значительное влияние на приживаемость при пересадке растений *in vivo* [24].

Использование при микроклональном размножении растений соединений кремния ещё недостаточно изучено, но известно, что они снижают уровень стресса у растений, повышают адаптивный потенциал [25]. Исследования, проведенные на микрорастениях картофеля сорта Ред Скарлет с добавлением в среду MS различных источников кремния (хелат кремния ЭДТА и силикат кремния), показали, что лучшая отзывчивость растений наблюдалась при внесении хелата кремния в количестве 3 мл/л (39 мг/л SiO₂). Отмечены статистически значимые различия с контролем по длине побегов (+8,27 см), корней (+ 27,51 см), количеству образованных междоузлий (+0,67) [26].

Применение кремний-гуминового препарата в наноразмерной форме наноБоГум-С в составе среды MS способствовало усилению роста и развития картофеля сорта Ароу [27]. При дозе 5 мл/л количество междоузлий повышалось на 23,3 % относительно контроля.

При изучении влияния спектрального состава света на физиологический ответ картофеля *in vitro* установлено, что повышение доли красного света (600–700 нм) с 56,4 до 75,2 % оказывало активизирующее действие на процессы роста и ризогенеза у эксплантов. Оснащение светильниками с интенсивностью потока света более 15 мкмоль/м²·с нецелесообразно, т. к. на изменения процессов роста и развития растений картофеля зеленый спектр света оказывает незначительное воздействие [28].

Получение микроклубней in vitro. Получение микроклубней в культуре *in vitro* является на сегодня самым перспективным методом для массового размножения оздоровленного пробирочного материала в системе семеноводства картофеля. Подбором питательных сред, свето-температурных параметров и фотопериодов можно добиться увеличения числа оздоровленного материала.

Исследования, проведенные в ФГБУН «Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук», позволили выявить условия культивирования, при которых возросла доля

микрорастений с микроклубнями на 6–12 % в зависимости от сорта картофеля и сократился срок клубнеобразования. Эти условия характеризовались освещенностью 75–85 мкмоль/м²·с, 6500 К, температурой воздуха 22–25 °С, относительной влажностью воздуха 70–75 % и фотопериодом 12 ч. Выращивание проводили на модифицированной среде MS с добавлением 6%-ной сахарозы в объеме 10 мл на одно микрорастение [29]. Македонские ученые исследовали добавление в среду MS различных комбинаций и концентраций ауксинов и цитокининов (бензламинопурина (BAP), кинетина (KIN), нафталинуксусной кислоты (NAA)) в сочетании с различными концентрациями сахарозы при клональном микроразмножении и микроклубнеобразовании ряда сортов картофеля. Авторами установлено, что культивирование узловых сегментов сорта Agata на среде MS + 6 мг/л BAP + 2 мг/л NAA + 8 % сахарозы способствовало 100%-ному образованию микроклубней, сорта Ultra – 58,33 %, Sunshine – 33,33 % [30].

Институтом биотехнологии Национального исследовательского центра Каира (Египет) для культивирования микроклубней *in vitro* предлагается среда MS, содержащая кинетин (2,5 мг/л), сахарозу (90 г/л) и кумарин (20 мг/л). Процент клубнеобразования при этом составляет 96 %, количество клубней на саженце – 1,5 шт., масса микроклубней – в среднем 87,2 мг [31].

Другие исследователи для повышения массы микроклубней предлагают добавлять в питательную среду MS активированный уголь. Оптимальное содержание последнего в среде зависит от сорта картофеля, так максимальную массу у сорта Desiree отмечали при концентрации активированного угля 2 г/л, у сорта Spunta при более высокой дозе – 10 г/л [32].

Существует запатентованный способ [33] активизации растений картофеля в культуре *in vitro* с целью формирования клубней, согласно которому для повышения синхронизации делений митоза экспланты сразу после посадки *in vitro* находятся 120 ч без света при температуре 5 °С, после чего 10 суток выращиваются при температуре 25 °С и освещении интенсивностью 70–310 мВт/м², длиной волны 670 нм и уровне освещенности 2600 лк. Описанный методический цикл повторяется три раза. Представленные приёмы позволяют ускорить рост и развитие микрорастений картофеля в условиях *in vitro*, увеличить у них суммарную площадь листьев, число главных и придаточных

корней и, как результат, повысить количество и массу образующихся микроклубней.

Адаптация микрорастений к условиям in vivo и получение миниклубней. Весьма актуальной производственной проблемой являются трудности адаптации микрорастений к микроклимату теплиц. Для решения этих задач также применяют различные регуляторы роста, биологически активные вещества, гуминовые препараты, что повышает эффективность адаптации картофеля при пересадке из пробирки в почвенный грунт. Использование препарата Макс Супер Гумат на основе гуминовых кислот с микроэлементами для замачивания микрорастений картофеля перед высадкой *ex vitro* в дозе 2 мл/л с поливом *in vivo* в дозе 4 мл/л способствовало повышению уровня их приживаемости в зависимости от сорта: Импала, Бриз – на 7–10 %, Тимо Ханккян – на 23–27 % по сравнению с поливом водой [34].

Проведение исследований в условиях защищенного грунта при двукратной (через 7 и 14 дней после посадки) прикорневой обработке в дозах 0,05 и 0,1 мл/л препаратом Рибав-Экстра меристемных растений способствовало увеличению таких биометрических показателей, как высота растений (на 36,3 и 43,6 %), количество стеблей в кусте (на 10,9 и 28,3 %) и масса корней (на 20,0 и 28,3 %) соответственно дозам препарата. При этом урожайность картофеля благодаря более интенсивному росту корней увеличилась на 12,3 и 22,6 % [17].

Изучен способ выращивания миниклубней картофеля в системах закрытого грунта с использованием новых регуляторов роста комбинированного защитно-стимулирующего действия Нигор на основе гуматов, относящегося к классу фитоиммуномодуляторов, и Вигор Форте (действующее вещество ортокрезоксиуксусная кислота триэтаноламмониевой соли). Применение данных препаратов трехкратно в концентрации 1 мл/л на трех сортах картофеля Ривьера, Удача, Невский увеличило показатель приживаемости растений в среднем в 3,5 раза, а вес одного миниклубня на 12–28 % по сравнению с контролем [35].

Для повышения приживаемости картофеля *ex vitro* в закрытом грунте коллективом Мичуринского ГАУ [36] были исследованы следующие укрытия: пластиковые стаканы, нетканый материал Спанбонд, полиэтиленовая пленка вместе со Спанбондом. При этом эффективность проявили все примененные в эксперименте способы укрытия. Среди них использование Спанбонда оказалось наименее затрат-

ным и трудоемким со 100%-ной приживаемостью микрорастений.

В исследованиях Удмуртского научно-исследовательского института сельского хозяйства [37] посадка в грунт предварительно укорененных микрорастений картофеля обеспечивала повышение их приживаемости на 13 % и образование количества миниклубней на 22 % по сравнению с посадкой пробирочных растений. При разреженном характере посадок (71 тыс. растений/га) независимо от сроков высадки и вида посадочного материала наблюдалась наибольшая доля прижившихся микрорастений картофеля. Данный показатель был достоверно ниже в рекомендованном (95 тыс. растений/га) варианте посадок на 6 % и уплотненном (143 тыс. растений/га) – на 10 % [37].

Кроме того, выбор сорта обуславливает адаптивные способности растений к конкретным условиям. Так, в условиях северо-востока Казахстана приживаемость регенерантов сортов Латона и Ред Скарлет была выше, чем у сортов Гала, Инноватор, Сантэ [24].

Применение биотехнологических установок гидро- и аэропонного типа в производственном цикле позволяет выращивать миниклубни в замкнутом помещении. Такой метод препятствует воздействию внешних факторов, в том числе и попаданию возбудителей инфекционных заболеваний [38], что особенно важно.

В беспочвенных культурах оптимизация состава и количества питательных веществ является наиболее важным фактором для получения высоких урожаев «чистых» семян картофеля, причем для каждого сорта картофеля может потребоваться определенный питательный раствор. Подобного рода исследования проводятся во многих российских и зарубежных научных центрах, изучаются различные составы макро- и микроэлементов, pH питательного раствора, инокуляция растений ростостимулирующими биопрепаратами [39, 40, 41]. Исследователи Пермского НИИ сельского хозяйства [42] отмечают, что при выращивании в условиях искусственного освещения на аэропонных установках растения картофеля отличаются активным ростом и развитием миниклубней.

В Национальном центре водных исследований Египта изучается возможность внедрения технологии Интернета вещей (IoT) в гидропонные и аэропонные тепличные системы. Платформа предназначена для автоматизации и хранения параметров системы, а также для обеспечения удаленного доступа к графическому интерфейсу. Повышение эффектив-

ности использования воды и энергии, удобрений и пестицидов наряду с увеличением урожайности и выращиванием здоровых растений делает разрабатываемую систему экономически оправданной [43].

Заключение. В настоящее время поисковые исследования в области повышения эффективности выращивания исходного материала картофеля имеют несколько основных направлений, таких как модернизация питательных сред для получения крепких эксплантов микрорастений и увеличения образования микроклубней *in vitro*. Для этого в стандартную среду Мурасиге-Скуга вводят различные регуляторы роста химического и биологического происхождения или их сочетаний, увеличивают содержание химических элементов. Отдельная роль отводится исследованиям по оптимизации физических факторов при размножении *in vitro*. В совокупности все исследования направлены на ускорение развития корневой

системы микрорастений, увеличение их биомассы, формирование материала для черенкования с повышенной приживаемостью, получения большего числа микроклубней.

Отдельная роль отводится исследованиям по совершенствованию технологических приёмов, повышающих адаптацию микрорастений к условиям *in vivo*. Отмечается проведение активных исследований по применению разнообразных регуляторов роста при пересадке микрорастений, особая роль отводится укрывному материалу и схемам посадок. Перспективным является применение биотехнологических гидропонных и аэропонных установок при возделывании *in vivo*. Будучи закрытыми системами, они исключают возможность попадания возбудителей инфекционных заболеваний при выращивании микроклубней. Кроме того, большое значение имеет адаптация условий тиражирования той или иной технологии к конкретным сортам картофеля.

Список литературы

1. Гавриленко Т. А., Ермишин А. П. Межвидовая гибридизация картофеля: теоретические и прикладные аспекты. Вавиловский журнал генетики и селекции. 2017;21(1):16–29. DOI: <http://doi.org/10.18699/VJ17.220> EDN: XYEBBV
2. Алексашина С. А., Макарова Н. В. Сравнительное изучение химического состава и антиоксидантной активности клубней сортового картофеля. Химия растительного сырья. 2022;(2):221–231. DOI: <https://doi.org/10.14258/jcprm.20220210129> EDN: GENQHP
3. Анисимов Б. В. Мировое производство картофеля: тенденции рынка, прогнозы и перспективы (аналитический обзор). Картофель и овощи. 2021;(10):3–8. DOI: <https://doi.org/10.25630/PAV.2021.45.71.008> EDN: OQKWFV
4. Ерёмченко О. А., Черченко О. В. Риски реализации комплексной научно-технологической программы, направленной на развитие селекции и семеноводства картофеля в Российской Федерации. Экономика науки. 2018;4(3):175–197. DOI: <https://doi.org/10.22394/2410-132X-2018-4-3-175-197>
5. Pradana O. C. P., Maulida D., Andini S. N. Micropropagation of potato (*Solanum tuberosum* L.) var. Atlantic on various culture media composition. International Conference On Agriculture and Applied Science (ICoAAS). 2020. pp. 27–34. DOI: <https://doi.org/10.25181/icoaas.v1i1.2006>
6. Mohapatra P. P., Batra V. K. Tissue Culture of Potato (*Solanum tuberosum* L.): A Review. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences. 2017;6(4):489–495. DOI: <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.604.058>
7. Поливанова О. Б., Егорова А. С., Сиволапова А. Б., Горюнова С. В. Технология протопластов и соматическая гибридизация картофеля – современное состояние и перспективы (обзор). Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2023;24(1):7–19. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.1.7-19> EDN: QLNZXP
8. Анципович В. Депонирование национальной коллекции картофеля. Наука и инновации. 2019; (6(196)):12–16. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38514904> EDN: UFCBUG
9. Камалов А. В., Эргашев О. К., Исакова О. М., Хайдарова М. О. Технология размножения картофеля сорта «суперэлита» методом *in vitro*. Universum: технические науки. 2020;(8-3(77)):5–9. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43939726> EDN: MBUERZ
10. Megrelishvili I., Bulauri E., Chipashvili T., Kukhaleishvili M. Auxin and cytokine treatment effect in combination with sucrose on *in vitro* potato regeneration. International Journal of Advanced Research. 2016;4(8):118–122. DOI: <https://doi.org/10.21474/IJAR01/1192>
11. Almatatov B. U., Sultonova N. M., Kudratov F. N., Kushiev Kh. H. Hormonal Balance During Adaptation of Potatoes in the Conditions of Salinization. International Journal of Genetic Engineering. 2020;8(1):7–10. DOI: <https://doi.org/10.5923/j.ijge.20200801.02>
12. Wang Y., Jiao Y. Auxin and Above-Ground Meristems. Journal of Experimental Botany. 2018;69(2):147–154. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/erx299>
13. Munggarani M., Suminar E., Nuraini A., Mubarak S. Shoots Multiplication of Mericlon Potato on Various Types and Concentrations of Cytokinins. Agrologia. 2018;7(2):80–89. DOI: <http://dx.doi.org/10.30598/a.v7i2.766>
14. Kumlay A. M. Combination of the auxins NAA, IBA, and IAA with GA3 improves the commercial seed-tuber production of potato (*Solanum tuberosum* L.) under *in vitro* conditions. BioMed research international. 2014;2014:439259. DOI: <https://doi.org/10.1155/2014/439259>

15. Луговцова С. Ю., Ступко В. Ю. Концентрация и соотношение ИУК и гиббереллиновой кислоты как факторы эффективности микроклонального размножения картофеля. Аграрный научный журнал. 2024;(1):32–38. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=59761544> EDN: OKMYWR
16. Машенко М. Н. Влияние стресспротекторов-фиторегуляторов бензилола и этилола на рост и развитие проростков картофеля – 3 год изучения. Новости науки в АПК. 2019;(3(12)):114–120. DOI: <https://doi.org/10.25930/2218-855X/027.3.12.2019> EDN: LOCWVP
17. Уромова И. П., Новиков Д. А., Машакин А. М., Соколов И. С., Шихалеева Е. В., Шихалеева С. В. Биопрепарат Рибав-Экстра в технологии размножения оздоровленного картофеля. Успехи современного естествознания. 2017;(7):54–58. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29771755> EDN: ZBMWOW
18. Nguyen T. T., Alizadeh H., Leung D. W. Response of potato (*Solanum tuberosum* L., cv. Iwa) nodal explants to low inorganic nitrogen supply in vitro. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology. 2021;38:102215. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2021.102215>
19. Hoque M. E., Hena H., Ali M. E. Potato (*Solanum tuberosum* L.) Plantlet Regeneration in Ammonium Nitrate Free Stock Solution-1 of Murashige & Skoog (MS, 1962) Plant Tissue Culture Medium. European Journal of Biology and Biotechnology. 2022;3(5):30–34. DOI: <https://doi.org/10.24018/ejbio.2022.3.5.413>
20. Munthali C., Kinoshita R., Onishi K., Rakotondrara A., Mikami K., Koike M., Tani M., Palta J., Aiuchi D. A Model Nutrition Control System in Potato Tissue Culture and Its Influence on Plant Elemental Composition. Plants (Basel). 2022;11(20):2718. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants11202718>
21. Yessilbekova Ye. Ye., Khosnutdinova T. S., Bogdanova X. O., Dolanbayeva G. T., Zhakmanova Ye. A. Influence of a selenium-containing stimulant on the growth, development and yield potential of potato plants (*Solanum tuberosum*). IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022;1010:012144. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1010/1/012144>
22. Lekamge D., Sasahara T., Yamamoto S. I., Hatamoto M., Yamaguchi T., Maki S. Effect of enhanced CaCl₂, MgSO₄, and KH₂PO₄ on improved in vitro growth of potato. Plant Biotechnology. 2021;38(4):401–408. DOI: <https://doi.org/10.5511/plantbiotechnology.21.0830a>
23. Radouani A., Lauer F. I. Effect of NPK Media Concentrations on In Vitro Potato Tuberization of Cultivars Nicola and Russet Burbank. American Journal of Potato Research. 2015;92:294–297. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12230-014-9420-x>
24. Аникина И. Н. Гидрогумат как фактор повышения резистентности растений *in vitro*. Международный научно-исследовательский журнал. 2015;(2-2(33)):8–10. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23176006> EDN: TNEEIL
25. Аминова Е. В., Мушинский А. А., Саудабаева А. Ж. Стрессоустойчивость растений *Solanum tuberosum* под влиянием УДЧ диоксида кремния. Животноводство и кормопроизводство. 2020;103(3):16–23. DOI: <https://doi.org/10.33284/2658-3135-103-3-16> EDN: VIRCOR
26. Полякова М. Н., Хабарова Л. Н. Влияние различных источников кремния на растения оздоровленного семенного картофеля в культуре *in vitro*. Научный вклад молодых исследователей в сохранение традиций и развитие АПК: Междунар. научн.-практ. конф. молодых учёных и студентов. СПб: Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, 2016. С. 54–56. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29403579> EDN: YTLKEV
27. Смирнова Ю. Д., Подолян Е. А. Применение нанопрепаратов для оптимизации микроклонального размножения картофеля. Аграрный научный журнал. 2024;(1):51–55. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=59761550> EDN: MCALAR
28. Варушкина А. М., Яхина А. И., Ширинкина А. С., Цёма Л. Г., Латыпова А. Л. Влияние спектрального состава света на физиологический ответ картофеля *in vitro*. Аграрный научный журнал. 2021;(4):8–11. DOI: <https://doi.org/10.28983/asj.y2021i4pp8-11> EDN: DOKRMH
29. Сомова Е. Н., Маркова М. Г., Власевская Е. А. Получение микроклубней картофеля на основе оптимизации условий культивирования *in vitro*. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2021;22(5):682–688. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2021.22.5.682-688> EDN: FJPIYS
30. Petrova I., Koleva L., Gudeva M. Micropropagation of potato seed tubers (*Solanum tuberosum* L.) under in vitro conditions. Journal of agriculture and plant sciences. 2022;20(2):37–43. DOI: <https://doi.org/10.46763/JAPS22202037p>
31. Mohamed A. E.-S., Girgis N. D. Factors affecting in vitro tuberization of potato. Bulletin of the National Research Centre. 2023;47:80. DOI: <https://doi.org/10.1186/s42269-023-01056-3>
32. Belguendouz A., Kaide Harche M., Benmahiou B. Evaluation of different culture media and activated charcoal supply on yield and quality of potato microtubers grown in vitro. Journal of Plant Nutrition. 2021;44(14):2123–2137. DOI: <https://doi.org/10.1080/01904167.2021.1881545>
33. Пахинин Р. В., Маратова С. А., Пугачева Г. М., Дубровский М. А. Способ стимулирования образования и развития микроклубней картофеля в условиях *in vitro*: пат. РФ № 2762416. №2021101311: заявл. 21.01.2021; опубл. 21.12.2021. Бюл. №36. 13 с. Режим доступа: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet
34. Лебедева Н. В., Федорова Ю. Н. Эффективность препарата Макс Супер Гумат при адаптации растений картофеля. Известия Великолукской государственной сельскохозяйственной академии. 2014;(3):10–14. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23024704> EDN: TJWCDJ
35. Гаврилова А. Ю., Гагарина И. Н., Горькова И. В. Эффективность применения биологически активных веществ на меристемных растениях картофеля в условиях защищенного грунта. Вестник аграрной науки. 2021;(6(93)):68–72. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn2587-666X.2021.6.68> EDN: WVJSMJ

36. Пугачева Г. М., Чусова Н. С., Никонов К. Е., Хорошкова Ю. В. Адаптация микрорастений картофеля к условиям *in vivo*. Наука и образование. 2021;4(1):158. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45755055> EDN: QSTTJH
37. Власевский Д. Н., Мухаметшин И. Г., Власевская Е. А., Краснощёрова В. В. Влияние агротехнологических приемов адаптации на приживаемость микрорастений картофеля. Бюллетень науки и практики. 2017;(12):125–129. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1101192> EDN: USEKGD
38. Рубцов С. Л., Милехин А. В., Шевченко С. Н., Бакунов А. Л., Дмитриева Н. Н. Методика микроклонального размножения и производство оздоровленных миниклубней в оригинальном семеноводстве картофеля в условиях высокой инфекционной нагрузки Самарской области. Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2017;19(2-4):650–658. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=34966566> EDN: UPQDVL
39. Tessema L., Chindi A., Gebremedhin W. G., Solomon A., Shunka E., Seid E. Determination of Nutrient Solutions for Potato (*Solanum tuberosum* L.) Seed Production under Aeroponics Production System. Open Agriculture. 2017;2(1):155–159. DOI: <https://doi.org/10.1515/opag-2017-0015>
40. Григорян М. А., Ткаченко О. В., Шевченко Е. Н. Содержание хлорофилла в листьях различных сортов картофеля *in vitro* и в условиях аэропоники. Аграрные конференции. 2019;(1(13)):1–6. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37073545> EDN: VVXHRA
41. Ткаченко О. В., Евсеева Н. В., Каргаполова К. Ю., Денисова А. Ю., Позднякова Н. Н., Куликов А. А., Бурыйгин Г. Л. Повышение активности про/антиоксидантной системы микрорастений картофеля ризосферными бактериями в условиях аэропоники. Аграрный научный журнал. 2023;(3):65–72. DOI: <https://doi.org/10.28983/asj.y2023i3pp65-72> EDN: WDMWTQ
42. Цёма Л. Г., Латыпова А. Л. Сортная реакция растений картофеля при выращивании на аэропонных установках. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2023;24(3):359–366. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.3.359-366> EDN: VLUGTJ
43. Sadek N., Kamal N., Shehata D. Internet of Things based smart automated indoor hydroponics and aeroponics greenhouse in Egypt. Ain Shams Engineering Journal. 2024;15(2):102341. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102341>

References

1. Gavrilenko T. A., Ermishin A. P. Interspecific hybridization of potato: theoretical and applied aspects. *Vavilovskiy zhurnal genetiki i seleksii* = Vavilov Journal of Genetics and Breeding. 2017;21(1):16–29. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18699/VJ17.220>
2. Aleksashina S. A., Makarova N. V. Comparative study of the chemical composition and antioxidant potential of grade potato tubers. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* = Chemistry of plant raw material. 2022;(2):221–231. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.14258/jcprm.20220210129>
3. Anisimov B. V. World potato production: market trends, forecasts and prospects (analytical review). *Kartofel' i ovoshchi*. 2021;(10):3–8. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.25630/PAV.2021.45.71.008>
4. Yeremchenko O. A., Cherchenko O. V. Risks of the implementation of a comprehensive scientific and technological program aimed at the development of potato breeding and seed production in the Russian Federation. *Ekonomika nauki* = Economics of Science. 2018;4(3):175–197. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.22394/2410-132X-2018-4-3-175-197>
5. Pradana O. C. P., Maulida D., Andini S. N. Micropropagation of potato (*Solanum tuberosum* L.) var. Atlantic on various culture media composition. International Conference On Agriculture and Applied Science (ICoAAS). 2020. pp. 27–34. DOI: <https://doi.org/10.25181/icoaas.v1i1.2006>
6. Mohapatra P. P., Batra V. K. Tissue Culture of Potato (*Solanum tuberosum* L.): A Review. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences. 2017;6(4):489–495. DOI: <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.604.058>
7. Polivanova O. B., Egorova A. S., Sivolapova A. B., Goryunova S. V. Current state and prospects of protoplast technology and potato somatic hybridization (review). *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2023;24(1):7–19. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.1.7-19>
8. Antsipovich V. The national potato collection depositing. *Nauka i innovatsii* = The Science and Innovations. 2019;(6(196)):12–16. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38514904>
9. Kamalov A. V., Ergashev O. K., Isakova O. M., Khaydarova M. O. Technology of disassembling potatoes of super elite varieties by the *in vitro* method. *Universum: tekhnicheskie nauki*. 2020;(8-3(77)):5–9. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43939726>
10. Megrelishvili I., Bulauri E., Chipashvili T., Kukhaleishvili M. Auxin and cytokine treatment effect in combination with sucrose on *in vitro* potato regeneration. International Journal of Advanced Research. 2016;4(8):118–122. DOI: <https://doi.org/10.21474/IJAR01/1192>
11. Almatatov B. U., Sultonova N. M., Kudratov F. N., Kushiev Kh. H. Hormonal Balance During Adaptation of Potatoes in the Conditions of Salinization. International Journal of Genetic Engineering. 2020;8(1):7–10. DOI: <https://doi.org/10.5923/j.ijge.20200801.02>
12. Wang Y., Jiao Y. Auxin and Above-Ground Meristems. Journal of Experimental Botany. 2018;69(2):147–154. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/erx299>

13. Munggarani M., Suminar E., Nuraini A., Mubarak S. Shoots Multiplication of Mericlon Potato on Various Types and Concentrations of Cytokinins. *Agrologia*. 2018;7(2):80–89. DOI: <http://dx.doi.org/10.30598/a.v7i2.766>
14. Kumlay A. M. Combination of the auxins NAA, IBA, and IAA with GA3 improves the commercial seed-tuber production of potato (*Solanum tuberosum* L.) under in vitro conditions. *BioMed research international*. 2014;2014:439259. DOI: <https://doi.org/10.1155/2014/439259>
15. Lugovtsova S. Yu., Stupko V. Yu. Concentration and ratio of IAA and gibberellic acid as factors to affect the effectiveness of potato micropropagation. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal* = The Agrarian Scientific Journal. 2024;(1):32–38. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=59761544>
16. Mashchenko M. N. Influence of stressprotektorov fitoregulyatorov of benzikhol and etikhol on growth and development of probirochny plants of potatoes – 3 year of studying. *Novosti nauki v APK*. 2019;(3(12)):114–120. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.25930/2218-855X/027.3.12.2019>
17. Uromova I. P., Novikov D. A., Mashakin A. M., Sokolov I. S., Shikhaleeva E. V., Shikhaleeva S. V. The Ribav-Extra biological product in technology of reproduction the revitalized potatoes. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*. 2017;(7):54–58. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29771755>
18. Nguyen T. T., Alizadeh H., Leung D. W. Response of potato (*Solanum tuberosum* L., cv. Iwa) nodal explants to low inorganic nitrogen supply in vitro. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 2021;38:102215. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2021.102215>
19. Hoque M. E., Hena H., Ali M. E. Potato (*Solanum tuberosum* L.) Plantlet Regeneration in Ammonium Nitrate Free Stock Solution-1 of Murashige & Skoog (MS, 1962) Plant Tissue Culture Medium. *European Journal of Biology and Biotechnology*. 2022;3(5):30–34. DOI: <https://doi.org/10.24018/ejbio.2022.3.5.413>
20. Munthali C., Kinoshita R., Onishi K., Rakotondrafara A., Mikami K., Koike M., Tani M., Palta J., Aiuchi D. A Model Nutrition Control System in Potato Tissue Culture and Its Influence on Plant Elemental Composition. *Plants* (Basel). 2022;11(20):2718. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants11202718>
21. Yessilbekova Ye. Ye., Khosnutdinova T. S., Bogdanova X. O., Dolanbayeva G. T., Zhakmanova Ye. A. Influence of a selenium-containing stimulant on the growth, development and yield potential of potato plants (*Solanum tuberosum*). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022;1010:012144. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1010/1/012144>
22. Lekamge D., Sasahara T., Yamamoto S. I., Hatamoto M., Yamaguchi T., Maki S. Effect of enhanced CaCl₂, MgSO₄, and KH₂PO₄ on improved in vitro growth of potato. *Plant Biotechnology*. 2021;38(4):401–408. DOI: <https://doi.org/10.5511/plantbiotechnology.21.0830a>
23. Radouani A., Lauer F. I. Effect of NPK Media Concentrations on In Vitro Potato Tuberization of Cultivars Nicola and Russet Burbank. *American Journal of Potato Research*. 2015;92:294–297. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12230-014-9420-x>
24. Anikina I. N. Gidrogumat as a factor of increasing the resistance of plants in vitro. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* = International Research Journal. 2015;(2-2(33)):8–10. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23176006>
25. Aminova E. V., Mushinskiy A. A., Saudabaeva A. Zh. Stress tolerance of solanum tuberosum under the influence of silicon dioxide upfs. *Zhivotnovodstvo i kormoproizvodstvo* = Animal Husbandry and Fodder Production. 2020;103(3):16–23. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.33284/2658-3135-103-3-16>
26. Polyakova M. N., Khabarova L. N. The effect of various sources of silicon on plants of healthy seed potatoes in in vitro culture. Scientific contribution of young researchers to the preservation of traditions and the development of agriculture: International scientific and practical Conference of young scientists and students. Saint-Peterburgs: *Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet*, 2016. pp. 54–56. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29403579>
27. Smirnova Yu. D., Podolyan E. A. The use of nanosize preparation to optimize the potato microclonal reproduction. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal* = The Agrarian Scientific Journal. 2024;(1):51–55. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=59761550>
28. Varushkina A. M., Yakhina A. I., Shirinkina A. S., Tsema L. G., Latypova A. L. The influence of lighting spectral composition on physiological response of potato in vitro. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal* = The Agrarian Scientific Journal. 2021;(4):8–11. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.28983/asj.y2021i4pp8-11>
29. Somova E. N., Markova M. G., Vlasevskaya E. A. The obtaining potato microtubers on the basis of optimization of in vitro cultivation conditions. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2021;22(5):682–688. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2021.22.5.682-688>
30. Petrova I., Koleva L., Gudeva M. Micropropagation of potato seed tubers (*Solanum tuberosum* L.) under in vitro conditions. *Journal of agriculture and plant sciences*. 2022;20(2):37–43. DOI: <https://doi.org/10.46763/JAPS22202037p>
31. Mohamed A. E.-S., Girgis N. D. Factors affecting in vitro tuberization of potato. *Bulletin of the National Research Centre*. 2023;47:80. DOI: <https://doi.org/10.1186/s42269-023-01056-3>
32. Belguendouz A., Kaide Harche M., Benmahioul B. Evaluation of different culture media and activated charcoal supply on yield and quality of potato microtubers grown in vitro. *Journal of Plant Nutrition*. 2021;44(14):2123–2137. DOI: <https://doi.org/10.1080/01904167.2021.1881545>
33. Pakhinin R. V., Maratova S. A., Pugacheva G. M., Dubrovskiy M. A. A method for stimulating the formation and development of potato microtubers in in vitro conditions: Patent RF no. 2762416. 2021. URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet

34. Lebedeva N. V., Fedorova Yu. N. The effectiveness of the drug Max Super Humate in the adaptation of potato plants. *Izvestiya Velikolukskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii*. 2014;(3):10–14. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23024704>
35. Gavrilo A. Yu., Gagarina I. N., Gorkova I. V. The efficiency of the application of biologically active substances on meristematic potato plants under protected ground conditions. *Vestnik agrarnoy nauki* = Bulletin of Agrarian Science. 2021;(6(93)):68–72. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17238/issn2587-666X.2021.6.68>
36. Pugacheva G. M., Chusova N. S., Nikonov K. E., Khoroshkova Yu. V. adaptation of potato plants to *in vivo* conditions. *Nauka i obrazovanie*. 2021;4(1):158. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45755055>
37. Vlashevskiy D. N., Mukhametshin I. G., Vlashevskaya E. A., Krasnoperova V. V. Effect of agro technological methods of adaptation on the potatoes microplants survival. *Byulleten' nauki i praktiki* = Bulletin of Science and Practice. 2017;(12):125–129. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1101192>
38. Rubtsov S. L., Milekhin A. V., Shevchenko S. N., Bakunov A. L., Dmitrieva N. N. The method of microclonal propagation and production of improved minitubers in pre-basic potato seed growing in conditions of high infectious loading. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* = Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2017;19(2-4):650–658. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=34966566>
39. Tessema L., Chindi A., Gebremedhin W. G., Solomon A., Shunka E., Seid E. Determination of Nutrient Solutions for Potato (*Solanum tuberosum* L.) Seed Production under Aeroponics Production System. *Open Agriculture*. 2017;2(1):155–159. DOI: <https://doi.org/10.1515/opag-2017-0015>
40. Grigoryan M. A., Tkachenko O. V., Shevchenko E. N. Chlorophyll content in the leaves of various potato varieties *in vitro* and under aeroponic conditions. *Agrarnye konferentsii*. 2019;(1(13)):1–6. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37073545>
41. Tkachenko O. V., Evseeva N. V., Kargaplova K. Yu., Denisova A. Yu., Pozdnyakova N. N., Kulikov A. A., Burygin G. L. Increased activity of the pro/antioxidant system of potato microplants by rhizospheric bacterias in aeroponics conditions. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal* = The Agrarian Scientific Journal. 2023;(3):65–72. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.28983/asj.y2023i3pp65-72>
42. Tsema L. G., Latypova A. L. Varietal reaction of potato plants grown on aeroponic installations. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2023;24(3):359–366. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.3.359-366>
43. Sadek N., Kamal N., Shehata D. Internet of Things based smart automated indoor hydroponics and aeroponics greenhouse in Egypt. *Ain Shams Engineering Journal*. 2024;15(2):102341. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102341>

Сведения об авторах

✉ **Смирнова Юлия Дмитриевна**, кандидат биол. наук, заместитель директора филиала по науке, Всероссийский научно-исследовательский институт мелиорированных земель – филиал ФГБНУ Федерального исследовательского центра «Почвенный институт имени В. В. Докучаева», д.27, п. Эммаусс, Калининский р-н, Тверская обл., Российская Федерация, 170530, e-mail: 2016vniimz-noo@list.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2435-2089>, e-mail: ulayad@yandex.ru

Подольян Елена Александровна, кандидат с.-х. наук, младший научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт мелиорированных земель – филиал ФГБНУ Федерального исследовательского центра «Почвенный институт имени В. В. Докучаева», д.27, п. Эммаусс, Калининский р-н, Тверская обл., Российская Федерация, 170530, e-mail: 2016vniimz-noo@list.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2754-0053>

Information about the authors

✉ **Yulia D. Smirnova**, PhD in Biological Science, Deputy Director of the Branch for Science, the Department of Reclamation Agriculture, All-Russian Research Institute of Reclaimed Lands – Branch of the Federal Research Centre V. V. Dokuchaev Soil Science Institute, 27, Emmauss village, Kalininsky district, Tver region, Russian Federation, 170530, e-mail: 2016vniimz-noo@list.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2435-2089>, e-mail: ulayad@yandex.ru

Elena A. Podolian, PhD in Agricultural Science, junior researcher, the Department of Reclamation Agriculture, All-Russian Research Institute of Reclaimed Lands – Branch of the Federal Research Centre V. V. Dokuchaev Soil Science Institute, 27, Emmauss village, Kalininsky district, Tver region, Russian Federation, 170530, e-mail: 2016vniimz-noo@list.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2754-0053>

✉ – Для контактов / Corresponding author

<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.3.330-339>

УДК 631.5:633.16(470.2)

Влияние агротехнологических факторов на урожайность ярового ячменя в условиях Ленинградской области

© 2024. М. А. Фесенко✉, А. М. Шпанев

ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт»,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Представлены результаты сравнительной оценки влияния основных агротехнологических факторов на формирование урожая ярового ячменя сорта Московский 86 в природно-климатических условиях Ленинградской области. Исследования проводили в период 2019–2021 гг. на дерново-слабоподзолистой супесчаной почве. Схема микрополевого опыта включала три изучаемых фактора: норма высева (4, 5 и 6 млн всх. семян/га), доза азотного удобрения (N_0 и N_{60}), гербицидная обработка (без обработки, Линтур, ВДГ). По результатам исследований определено, что более стабильный вклад в формирование урожайности ярового ячменя, по причине меньшей зависимости от погодных условий, оказывала норма высева семян (0,1 %, 28,0 и 18,0 % по годам исследований). Урожайность ячменя в опыте в большей степени определялась внесением азотного удобрения (47,4 %), чем нормой высева семян (13,9 %). Влияние этих факторов, главным образом, распространялось на густоту продуктивного стеблестоя, которая возрастала с увеличением нормы высева на 22,0–31,7 %, от внесения азотного удобрения – в 2,1 раза (2019 г.). В условиях острого дефицита влаги действие гербицида на урожайность ячменя было слабым (0,9–1,9 %) и не ощутимым с хозяйственной точки зрения. Стрессовый эффект от применения гербицида сильнее проявлялся в неудобренном варианте. Выраженный хозяйственный эффект от проведения гербицидной обработки (на уровне 18,2 % сохраненного урожая) отмечался на фоне высокой эффективности азотного удобрения. Формирование наибольшей урожайности ярового ячменя сорта Московский 86 (250 г/м²) достигалось за счет предпосевного внесения азотного удобрения в дозе 60 кг д. в./га, нормы высева 6 млн всх. семян/га и проведения гербицидной обработки.

Ключевые слова: *Hordeum vulgare* L., норма высева, азотные удобрения, гербицидная обработка, урожайность, элементы структуры урожая, вклад факторов

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт» (тема № FGEG-2022-0007).

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Фесенко М. А., Шпанев А. М. Влияние агротехнологических факторов на урожайность ярового ячменя в условиях Ленинградской области. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2024;25(3):330–339.

DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.3.330-339>

Поступила: 30.03.2024

Принята к публикации: 07.05.2024

Опубликована онлайн: 26.06.2024

The influence of agrotechnological factors on the yield of spring barley in the conditions of the Leningrad region

© 2024. Maria A. Fesenko✉, Alexander M. Shpanev

Agrophysical Research Institute, Saint-Petersburg, Russian Federation

The results of a comparative assessment of the influence of main agrotechnological factors on the harvest of spring barley cultivar 'Moskovsky 86' in natural and climatic conditions in the Leningrad Region are presented. The research was conducted between 2019 and 2021 on swardy cryptopodzol loamy sand soil. The scheme of micro field experiment included three studied factors: seeding rate (4, 5, and 6 million germinating seeds/ha), nitrogen fertilizer dose (N_0 and N_{60}) and herbicidal treatment (no treatment, Lintur, or EDG). According to the results of the research it was found that the seeding rate of 0.1 %, 28 %, and 18 % over the years of the study had a more stable influence on the yield of spring barley due to its less dependence on weather conditions. The yield of barley in the experiment (47.4 %) was more determined by the application of nitrogen fertilizer than by the seeding rate (13.9 %). These factors influenced mainly on the density of the productive stem, which increased with the raise in the seeding rate by 22.0–31.7 %. With the application of nitrogen fertilizer, it increased by 2.1 times (in 2019). Under conditions of acute moisture shortage, the effect of the herbicide on barley yields was weak (0.9–1.9 %) and not significant from the economic point of view. The impact of using the herbicide under stress was more evident in the variant without fertilizers. The formation of the highest yield of spring barley of the 'Moskovsky 86' cultivar (250 g/m²) was achieved due to the pre-sowing application of nitrogen fertilizer at a dose of 60 kg a.i./ha, a seeding rate of 6 million germinating seeds/ha and herbicidal treatment.

Keywords: *Hordeum vulgare* L., seeding rate, nitrogen fertilizers, herbicide treatment, yield, elements of crop structure, contribution of factors

Acknowledgments: the research was carried out under the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of the Agrophysical Research Institute (theme No. FGEG-2022-0007).

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

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

For citation: Fesenko M. A., Shpanev A. M. The influence of agrotechnological factors on the yield of spring barley in the conditions of the Leningrad region. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2024;25(3):330–339. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.3.330-339>

Received: 30.03.2024

Accepted for publication: 07.05.2024

Published online: 26.06.2024

Базовыми элементами роста урожайности полевых культур являются использование достижений селекции и внедрение прогрессивных агротехнологий [1, 2, 3]. Сорт определяет главные требования к агротехнологиям, которые дают возможность реализовать его генетический потенциал. У ячменя, как и у большинства сельскохозяйственных культур, отбор высокопродуктивных генотипов привел к сужению генетического разнообразия и уязвимости растений к стрессовым воздействиям разного происхождения [4, 5, 6]. В такой ситуации получение максимального урожая возможно только при химико-техногенной интенсификации растениеводства [7]. Как следствие, исследования, включающие весь комплекс агроприемов по созданию благоприятных условий для роста и развития растений ярового ячменя – основной фуражной культуры Ленинградской области, являются актуальными.

Среди агротехнологических мероприятий при возделывании ярового ячменя на дерново-подзолистых почвах Ленинградской области, характеризующихся естественным низким уровнем плодородия, большое значение имеет внесение удобрений. Так, повышение урожайности ярового ячменя от внесения средних и высоких доз минеральных удобрений варьировало по годам в пределах 1,49–2,17 т/га (60–173 %) [8]. При этом оптимальной дозой полного минерального удобрения можно считать 60 кг д. в./га [9].

В условиях сильной засоренности посевов, присущей регионам с достаточным и избыточным увлажнением, высокий хозяйственный эффект ожидается от проведения гербицидной обработки. По нашим данным, в зависимости от уровня азотного питания, хозяйственный эффект обработки посевов ячменя сорта Ленинградский гербицидом составил от 0,09 до 0,63 т/га, или 4,8–26,4 % [10].

Зависимость урожайности ячменя от нормы высева семян сортоспецифична. Максимальная

урожайность у сортов Суздалец, Авторитет, Саломе, Раушан получена при высева 5 млн всх. семян/га [11, 12, 13], сорта Амур – 3–4 [14], Знатный – 3,0–4,5 млн всх. семян/га [15]. Для сортов Нур, Приазовский 9, Ратник, Сокол, Алей, Алтайский 10, Ворсинский 2, Салаир влияние нормы высева на зерновую продуктивность ячменя было неоднозначным и зависело от погодных условий периода вегетации культуры [16, 17]. Существует мнение, что при возделывании культур в более прохладных и увлажненных климатических условиях норма высева семян должна увеличиваться, отчасти поэтому нормы высева в России в 1,5–2,0 раза выше, чем в Европе [18].

Цель исследований – изучить влияние комплекса агротехнологических факторов (норма высева, внесение азотного удобрения, гербицидная обработка) на формирование урожайности ярового ячменя в почвенно-климатических условиях Ленинградской области.

Научная новизна – определен вклад нормы высева, предпосевного внесения азотного удобрения и гербицидной обработки в формировании урожайности и элементов структуры урожая ярового ячменя сорта Московский 86 в почвенно-климатических условиях Ленинградской области. Показано отсутствие хозяйственного эффекта от применения гербицида в условиях длительного дефицита влаги.

Материал и методы. Исследования проводили в период 2019–2021 гг. на экспериментальной базе Меньковского филиала ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт», расположенного в Гатчинском районе Ленинградской области. Почва опытных полей дерново-слабоподзолистая супесчаная. Агрохимические показатели пахотного слоя почвы: pH_{KCl} – 4,5 (ГОСТ 26483-85¹), органическое вещество – 2,9 % (ГОСТ 26213-91²), P_2O_5 – 145,1 мг/кг почвы, K_2O – 48,4 мг/кг почвы (ГОСТ 26207-84³).

¹ГОСТ 26483-85. Почвы. Определение pH солевой вытяжки, обменной кислотности, обменных катионов, содержания нитратов, обменного аммония и подвижной серы методами ЦИНАО. М., 1985. 6 с.

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

²ГОСТ 26213-91. Почвы. Методы определения органического вещества. М., 1991. 8 с.

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

³ГОСТ 26207-84. Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО. М., 1984. 11 с. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/ef7/4294828346.pdf>

В изучении находился сорт ярового ячменя зернофуражного назначения Московский 86 (оригинатор – Московский НИИСХ «Немчиновка»), имеющий допуск к возделыванию в Северо-Западном регионе РФ с 2011 г. Из характеристики сорта известно, что он отзывчив на применение повышенных доз удобрений и средств защиты растений [19].

Схема микрополевого опыта включала три изучаемых фактора: норма высева (4, 5 и 6 млн всх. семян/га); доза азотного удобрения (N_0 и N_{60}); гербицидная обработка. В качестве азотного удобрения использовали аммиачную селитру, которую вносили под заделку культиватором перед посевом. Посев проводили вручную, с шириной междурядий 15 см и нормой, определенной схемой опыта для каждой делянки. Площадь делянки – 2 м² (1,7×1,2 м), общее количество делянок из расчета 4-кратной повторности – 48. Для борьбы с сорной растительностью использовали гербицид Линтур, ВДГ⁴ (0,135 кг/га) в фазу кущения культуры – 7 июня (2019 г.), 12 июня (2020 г.) и 10 июня (2021 г.)

Оценку засоренности делянок опыта и учет урожая проводили на 48 постоянных учетных площадках 0,1 м² (30×33 см), установленных после появления всходов ярового ячменя, в соответствии с методическими указаниями⁵.

Годы исследований значительно различались по метеоусловиям. По сумме активных температур отмечен период вегетации 2019 г., по количеству выпавших осадков – 2020 г., который превосходил 2021 г. (на 20,3 %) и 2019 г. (на 41,8 %). Начало вегетации ячменя в 2020 и 2021 гг. проходило при значительном количестве осадков. Общим для всех трех лет проведения опыта являлся дефицит осадков в период «всходы-кущение» (табл. 1). Низкие температуры 2-й декады мая в 2020 году задержали сроки появления всходов ярового ячменя. Самый короткий период вегетации ячменя наблюдали в 2021 г., чему способствовал длительный период высоких температур при отсутствии осадков в 1-2 декадах июля.

Статистическая обработка данных заключалась в проведении дисперсионного и корреляционного анализов в программе Excel.

Таблица 1 – Метеорологические условия и продолжительность периода вегетации ярового ячменя сорта Московский 86 в годы исследований (по данным метеопоста Менковского филиала Агрофизического НИИ) /
Table 1 – Meteorological conditions and duration of the growing season of spring barley ‘Moskovsky 86’ cultivar during the years of the research (according to the data of the weather station of the Menkovsky branch of the Agrophysical Research Institute)

Показатель / Indicator	2019 г.	2020 г.	2021 г.
Сумма активных температур в период «посев-созревание», °C / The sum of active temperatures during the sowing-ripening period, °C	1949	1809	1841
Сумма осадков в период «посев-созревание», мм / Total precipitation during the sowing-ripening period, mm	279	479	382
Гидротермический коэффициент ⁶ за период: / Hydrothermal coefficient for the period:			
посев-всходы / sowing-seedling	1,0	3,4	3,2
всходы-кущение / shoots-tillering	0,7	1,1	1,5
кущение-созревание / tillering-ripening	1,6	2,8	2,0
посев-созревание / sowing-ripening	1,4	2,6	2,1
Продолжительность периода, сутки: / Length of period, days:			
посев-всходы / sowing-seedling	16	22	12
всходы-созревание / shoots-ripening	100	96	82

Результаты и их обсуждение. Урожайность ярового ячменя в опыте варьировала в значительных пределах: от 80 до 280 г/м² –

в 2019 г., 210–340 – в 2020 г. и 70–130 г/м² – в 2021 г. (табл. 2).

⁴Линтур, ВДГ. Пестициды.ru. [Электронный ресурс].

URL: <https://www.pesticide.ru/pesticide/linтур> (дата обращения: 16.01.2024).

⁵Зубков А. Ф. Методические указания по оценке вредоносности комплекса вредных организмов при помощи путевого регрессионного анализа. Л.: ВИЗР, 1981. 32 с.

⁶Селянинов Г. Т. О сельскохозяйственной оценке климата. Труды по сельскохозяйственной метеорологии. Л., 1928. Вып. 20. С. 165–177.

Таблица 2 – Влияние агротехнических факторов на урожайность ярового ячменя сорта Московский 86 /
Table 2 – The influence of agrotechnical factors on the yield of spring barley ‘Moskovsky 86’ cultivar

Фактор опыта / Experiment factor			Урожайность, г/м ² / Productivity, g/m ²			
доза удобрений (A) / fertilizer dose (A)	норма высева, млн всх. семян/га (B) / seeding rate, million germinating seeds/ha (B)	гербицид (C) / herbicide (C)	2019 г.	2020 г.	2021 г.	среднее / average
N ₀	4	0	90	250	80	140
		Линтур, ВДГ / Lintur, VDG	90	270	100	150
	5	0	110	300	110	170
		Линтур, ВДГ / Lintur, VDG	100	260	120	160
	6	0	90	290	100	160
		Линтур, ВДГ / Lintur, VDG	80	270	120	150
N ₆₀	4	0	210	230	70	170
		Линтур, ВДГ / Lintur, VDG	280	210	90	190
	5	0	230	310	120	220
		Линтур, ВДГ / Lintur, VDG	220	300	110	210
	6	0	220	340	130	230
		Линтур, ВДГ / Lintur, VDG	280	340	130	250
Среднее по дозе удобрений (A) / Average by the dose of fertilizers (A)		N ₀	90	270	100	160
		N ₆₀	240*	290	110	210
Среднее по норме высева (B) / Average by the seeding rate (B)		4	170	240	90	160
		5	170	290*	110	190
		6	170	310*	120*	200
Среднее по гербициду (C) / Average by the herbicide (C)		0	160	290	100	180
		Линтур, ВДГ / Lintur, VDG	180	280	110	190
		НСП ₀₅ (ABC)	60	60	50	80
		НСП ₀₅ (A)	40	40	40	60
		НСП ₀₅ (B)	30	30	30	50
		НСП ₀₅ (C)	40	40	40	60

* Достоверные значения при P≥0,95 / Significant values at P≥0,95

Исследования показали, что в 2019 г. максимальный урожай ярового ячменя был получен на фоне с применением удобрения и гербицида при норме высева 6 млн всх. семян на гектар. При этом достоверные различия по урожайности ячменя отмечены только между вариантами с разной удобренностью культуры.

В 2020 и 2021 гг. урожайность ярового ячменя увеличивалась с повышением густоты стояния растений и внесением азотных удобрений. Наибольший урожай получен на фоне удобрений при норме высева 6 млн всх. семян/га.

Положительного действия гербицида обнаружено не было. Достоверные различия установлены только между вариантами с разными нормами высева.

Низкая хозяйственная эффективность гербицидной обработки нашла подтверждение по результатам проведения дисперсионного анализа. Вклад данного фактора в величину урожая в зависимости от года составил 0,9–1,9 %, взаимодействие эффектов с другими агротехнологическими факторами было таким же слабым (табл. 3). Выявлено статистически

значимое взаимодействие азотного удобрения и нормы высева семян как по данным 2020 г., так и обобщенным данным 2019–2021 гг.

Внесением азотного удобрения в большей степени определялась урожайность ячменя в опыте (47,4 %), чем нормой высева (13,9 %).

Таблица 3 – Вклад агротехнологических факторов в формирование урожайности ярового ячменя сорта Московский 86 в условиях Ленинградской области /

Table 3 – The contribution of agrotechnological factors to the formation of the yield of spring barley of the 'Moskovsky 86' cultivar in the conditions of the Leningrad region

Фактор / Factor	Доля влияния, % / Share of influence, %			
	2019 г.	2020 г.	2021 г.	среднее / average
Норма высева (НВ) / Seeding rate (SR)	0,1	28,0*	18,0*	13,9*
Азотное удобрение (АУ) / Nitrogen fertilizer (NF)	75,3*	1,6	0,7	47,4*
Гербицидная обработка (ГО) / Herbicide treatment (HT)	1,1	0,9	1,9	0,5
Взаимодействие НВ + АУ / Interactions SR + NF	1,4	15,7*	5,4	7,6*
Взаимодействие НВ + ГО / Interactions SR + HT	1,4	0,5	0,4	1,8
Взаимодействие АУ + ГО / Interactions NF + HT	1,6	0,0	0,8	0,5
Взаимодействие НВ + АУ + ГО / Interactions SR + NF + HT	1,5	1,7	0,2	0,7

* Достоверные значения при $P \geq 0,95$ / Significant values at $P \geq 0,95$

По усредненным данным за 2019–2021 гг., лучшим по урожайности ярового ячменя в опыте выделился вариант, в котором осуществлялось предпосевное внесение азотного удобрения, посев с нормой высева 6 млн всх. семян/га, проведение гербицидной обработки.

Рассматривая отдельно блок без внесения азотных удобрений, можно отметить, что наивысшая урожайность ячменя фиксировалась при норме высева 5 млн всх. семян/га, поскольку увеличение количества растений, произрастаемых на единице площади посева, приводило к снижению их продуктивности. По мере увеличения нормы высева масса зерна

с колоса снижалась с 0,37 до 0,34 и 0,28 г, что получило и статистическое подтверждение. При норме высева 6 млн всх. семян/га наблюдали резкое снижение озерненности колоса (на 20,2 %) и в меньшей степени массы 1000 зерен (на 7,5 %). В вариантах с внесением азотного удобрения подобных эффектов не отмечалось.

Анализ корреляционной матрицы показал, что основным компонентом, определяющим урожайность ярового ячменя, являлась густота продуктивного стеблестоя, далее в порядке убывания значимости располагались элементы структуры – «масса зерна с колоса», «число зерен в колосе» и «масса 1000 зерен» (табл. 4).

Таблица 4 – Коэффициенты корреляции между урожайностью и элементами структуры урожая ярового ячменя сорта Московский 86 /

Table 4 – Correlation coefficients between the yield and the elements of the yield structure of spring barley of the 'Moskovsky 86' cultivar

Элемент структуры урожая / Harvest structure element	2019 г.	2020 г.	2021 г.	Среднее / Average
Густота продуктивных стеблей, шт/м ² / Density of productive stems, pieces/m ²	0,93*	0,71*	0,77*	0,85*
Число зерен в колосе, шт/колос / Number of grains in an ear, pieces/ear	0,57*	0,41*	0,39*	0,62*
Масса зерна с колоса, г/колос / Grain weight per ear, grams/ear	0,63*	0,50*	0,57*	0,80*
Масса 1000 зерен, г / Weight of 1000 grains, grams	0,32*	0,54*	0,56*	0,54*

* Достоверные значения при $P \geq 0,95$ / Significant values at $P \geq 0,95$

Густота продуктивного стеблестоя достоверно возрастала с увеличением нормы высева семян во все годы изучения, в среднем на 98–141 шт/м², или 22,0–31,7 %. Действие азотного удобрения на данный элемент структуры урожая было значимым только в 2019 г., когда

густота продуктивных стеблей увеличилась на 306 шт/м² (в 1,8 раза) и на 463 шт/м² (в 2,4 раза) в сочетании с гербицидной обработкой (табл. 5). Озерненность колоса увеличилась с улучшением азотного питания растений на 5,4–20,3 %.

Таблица 5 – Влияние агротехнических факторов на значения элементов структуры урожая ярового ячменя сорта Московский 86 /

Table 5 – The influence of agrotechnical factors on the values of the elements of the yield structure of spring barley ‘Moskovsky 86’ cultivar

Доза удобрений (А) / Fertilizer dose (A)	Норма высева, млн. всх. семян/га (В) / Seeding rate, million germinating seeds/ha (B)	Гербицид (С) / Herbicide (C)	Густота продуктив- ных стеблей, шт/м² / Density of productive stems, pieces/m²			Число зерен в колосе, шт. / Number of grains in an ear, pieces/ear			Масса 1000 зерен, г / Weight of 1000 grains, grams		
			2019 г.	2020 г.	2021 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.
N ₀	4	0	350	523	290	5,9	11,5	8,9	41,8	41,5	30,4
		Линтур,ВДГ/ Lintur, VDG	303	485	313	6,7	13,4	9,7	45,8	41,4	30,7
	5	0	363	678	385	7,5	10,8	9,0	38,8	40,6	29,7
		Линтур,ВДГ/ Lintur, VDG	365	620	430	6,8	11,0	8,0	41,6	38,9	32,3
	6	0	423	770	473	5,7	9,7	6,3	37,1	38,9	29,6
		Линтур,ВДГ/ Lintur, VDG	333	678	498	6,1	10,4	6,8	37,9	37,7	32,9
N ₆₀	4	0	578	503	268	8,7	11,5	9,3	42,9	38,3	27,5
		Линтур,ВДГ/ Lintur, VDG	763	473	275	8,1	11,6	9,8	44,8	37,3	30,0
	5	0	713	658	393	7,9	11,4	9,4	41,1	39,8	29,4
		Линтур,ВДГ/ Lintur, VDG	765	623	398	6,5	11,9	8,8	44,8	39,4	30,3
	6	0	763	675	458	6,8	12,3	8,9	42,4	41,0	30,1
		Линтур,ВДГ/ Lintur, VDG	860	770	408	7,9	11,5	9,6	42,4	38,7	30,9
Среднее по дозе удобрений (А) / Average dose of fertilizers (A)		N ₀	356	625	398	6,4	11,1	8,1	40,5	39,8	30,9
		N ₆₀	740*	617	366	7,7	11,7	9,3	43,1	39,1	29,7
Среднее по норме высева (В) / Average by seeding rate (B)		4	517	518	300	7,6	11,9*	10,0	43,5	39,9	30,6
		5	556	665*	409*	7,3	11,3	9,1	41,0	39,5	31,2
		6	588	714*	456*	7,1	10,9	8,2*	40,0	38,9	30,5
Среднее по гербициду (С) / Average by herbicide (C)		0	531	634	378	7,1	11,2	8,6	40,7	40,0	29,5
		Линтур,ВДГ/ Lintur, VDG	565	608	387	7,0	11,6	8,8	42,9	38,9	31,2
		НСР ₀₅ (ABC)	147	73	113	1,7	1,4	1,8	6,5	1,8	3,3
		НСР ₀₅ (А)	104*	51	80	1,2*	1,0	1,3*	4,6	1,3	2,3
		НСР ₀₅ (В)	85*	42*	65*	1,0	0,8*	1,1*	3,8	1,0	1,9
		НСР ₀₅ (С)	104	51	80	1,2	1,0	1,3	4,6	1,3*	2,3*

* Достоверные значения при P≥0,95 / Significant values at P≥0.95

Применение гербицида – единственный фактор в опыте, который оказывал воздействие непосредственно на вегетирующие

растения ячменя, а значит, и на формирование продуктивности в процессе роста и развития культуры.

Показанием для проведения обработки гербицидами является превышение порогового уровня засоренности посева, равного 10–12 % проективного покрытия сорными растениями в фазу кущения культуры [20]. В нашем эксперименте величина проективного покрытия составляла 26,4 % (2019 г.), 25,9 (2020 г.) и 27,0 % (2021 г.), что указывает на целесообразность проведения гербицидной обработки в каждый из годов исследований. Необходимость в таковой еще более возрастала в варианте с внесением азотного удобрения, где проективное покрытие сорными растениями увеличивалось в зависимости от года на величину, равную 7,1–22,0 %, или в 1,3–2,4 раза. Только в условиях 2021 г. просматривалась некоторая тенденция к снижению засоренности участков по мере увеличения нормы высева ячменя. Проективное покрытие сорными растениями составляло 28,0, 27,1 и 26,0 % при нормах высева 4, 5 и 6 млн всх. семян/га соответственно.

Действие гербицида на все элементы структуры урожая ячменя было неоднозначным и слабым, отрицательным на фоне дефицита

азотного питания, что подтверждается наличием визуально просматриваемого стрессового эффекта у ярового ячменя от гербицидной обработки в условиях жаркой засушливой погоды. В варианте с внесением азотного удобрения столь сильного отрицательного эффекта на густоту стеблестоя и другие элементы структуры урожая ячменя не отмечалось.

Совместное влияние гербицидной обработки и других изучаемых агротехнологических факторов не приводило к достоверным изменениям элементов структуры урожая, что подтверждается отсутствием эффектов взаимодействия между ними (табл. 6). Исключением являлось действие гербицида и азотного удобрения на густоту продуктивного стеблестоя. Выбором нормы высева в основном определялась густота продуктивного стеблестоя (47,1 %), в меньшей степени число и масса зерна в колосе. Действие азотных удобрений распространялось на те же элементы структуры урожая, но по силе влияния, оказываемого на густоту продуктивных стеблей, уступало норме высева.

Таблица 6 – Вклад агротехнологических факторов в формирование элементов структуры урожая ярового ячменя сорта Московский 86 в условиях Ленинградской области (среднее за 2019–2021 гг.) /
Table 6 – Contribution of agrotechnological factors to the formation of elements of the spring barley harvest structure in the conditions of the Leningrad region ‘Moskovsky 86’ cultivar (average for 2019–2021)

Фактор / Factor	Доля влияния на элементы структуры урожая, % / Share of influence on the elements of the crop structure, %			
	густота продуктивных стеблей / density of productive stems	число зерен в колосе / number of grains in an ear	масса зерна в колосе / weight of grain in an ear	масса 1000 зерен / weight of 1000 grains
Норма высева (НВ) / Seeding rate (SR)	47,1*	18,7*	17,1*	4,8
Азотное удобрение (АУ) / Nitrogen fertilizer (NF)	33,1*	22,4*	15,1*	0,3
Гербицидная обработка (ГО) / Herbicide treatment (HT)	0,1	0,7	1,6	5,6
Взаимодействие НВ + АУ / Interactions SR + NF	0,3	12,2*	16,0*	15,4*
Взаимодействие НВ + ГО / Interactions SR + HT	0,2	5,1	3,4	1,6
Взаимодействие АУ + ГО / Interactions NF + HT	2,4*	1,3	1,4	0,5
Взаимодействие НВ + АУ + ГО / Interactions SR + NF + HT	0,9	1,5	1,3	0,8

* Достоверные значения при $P \geq 0,95$ / Significant values at $P \geq 0,95$

Выводы. 1. Формирование наибольшей урожайности ярового ячменя сорта Московский 86 в благоприятных условиях увлажнения (ГТК – 2,1–2,6) достигалось за счет предпо-

севного внесения азотного удобрения в дозе 60 кг д. в./га, проведения гербицидной обработки и нормы высева 6 млн. всх. семян/га. При неблагоприятном гидротермическом режиме

(ГТК = 1,4) увеличение нормы высева с 4 до 6 млн всх. семян/га не приводило к повышению урожайности ячменя, которая максимальной величины достигала на фоне улучшения азотного питания и уничтожения сорных растений гербицидами.

2. Наиболее стабильным по оказываемому воздействию на величину урожайности ячменя выявлено влияние нормы высева, которое достоверно проявилось в два года из трех (на уровне 18 и 28 %), тогда как хозяйственная эффективность азотных удобрений и гербицидной обработки в большей степени зависела от складывающихся погодных условий. Азотные удобрения обладают наиболее высоким потенциалом повышения зерновой продуктивности ярового ячменя в почвенно-климатических условиях Ленинградской области. Доля

влияния этого фактора достигала в один из годов исследования 75,3 %, прибавка урожая составила 2,7 раза. Как и в случае с нормой высева, положительное влияние азотного удобрения распространялось на все основные элементы структуры урожая – густоту продуктивного стеблестоя (33,1 %), число зерен в колосе (22,4 %) и массу 1000 зерен (15,1 %). В условиях дефицита влаги и азотного питания действие гербицида на урожайность и элементы структуры урожая ячменя было слабым и не ощутимым с хозяйственной точки зрения. На фоне высокой эффективности азотного удобрения отмечался выраженный хозяйственный эффект от проведения гербицидной обработки (на уровне 18,2 % сохраненного урожая), главным образом за счет большей густоты продуктивного стеблестоя.

Список литературы

1. Якушев В. П., Михайленко И. М., Драгавцев В. А. Агротехнологические и селекционные резервы повышения урожая зерновых культур в России. Сельскохозяйственная биология. 2015;50(5):550–560. DOI: <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2015.5.550rus> EDN: UXSRID
2. Сурин Н. А., Герасимов С. А., Бобровский А. В., Крючков А. А. Разработка элементов сортовой агротехники зерновых культур в Красноярском крае. Земледелие. 2021;(7):22–25. DOI: <https://doi.org/10.24412/0044-3913-2021-7-22-25> EDN: KWWBYJ
3. Зотиков В. И., Полухин А. А., Грядунова Н. В. Развитие инновационных агротехнологий в растениеводстве на основе селекционных достижений. Зернобобовые и крупяные культуры. 2023;(2(46)):5–9. DOI: <https://doi.org/10.24412/2309-348X-2023-2-5-9> EDN: GGAMMB
4. Лялина Е. В., Болдырев С. В., Поморцев А. А. Современное состояние генетического разнообразия ярового ячменя (*Hordeum vulgare* L.) в России по аллелям гордеинкодирующих локусов. Генетика. 2016;52(6):650–663. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0016675816060072> EDN: WDOMKN
5. Кокина Л. П., Щеклеина Л. М., Кунилова А. В. Источники селекционно-ценных признаков и их использование в создании адаптивных к условиям Волго-Вятского региона сортов ячменя. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2017;(3):9–14. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2017.58.3.09-14> EDN: YOQWWB
6. Филиппов Е. Г., Брагин Р. Н., Донцов Д. П. Анализ показателей адаптивности сортов и линий ярового ячменя в экологическом сортоиспытании. Таврический вестник аграрной науки. 2022;(4(32)): 221–230. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49982577> EDN: WFQBII
7. Жученко А. А. Пути инновационно-адаптивного развития АПК России в XXI столетии. Киров: НИИСХ Северо-Востока, 2011. 143 с.
8. Шпанев А. М., Фесенко М. А., Смук В. В. Эффективность комплексного применения средств химизации при возделывании ярового ячменя на Северо-Западе РФ. Агрохимия. 2019;(12):47–55. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0002188119120093> EDN: OTXGRF
9. Седяков М. В. Влияние агротехнологических приемов на хозяйственно-ценные признаки новой перспективной линии ярового ячменя Л-1800. Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2021;(1(62)):59–67. DOI: <https://doi.org/10.24412/2078-1318-2021-1-59-67> EDN: ALPGNC
10. Шпанев А. М. Влияние доз азотного удобрения на эффективность гербицидной обработки в посевах зерновых культур на Северо-Западе РФ. Агрохимия. 2021;(10):74–80. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002188121100136> EDN: HKOWZI
11. Владимиров В. П., Гареев И. Р., Бизянов С. Я. Продуктивность и качество зерна ячменя в зависимости от норм высева и расчетных доз удобрений в условиях лесостепи Среднего Поволжья. Вестник Чувашской государственной сельскохозяйственной академии. 2019;(3(10)):21–26. DOI: <https://doi.org/10.17022/800m-6792> EDN: YXZVRA
12. Таланов И. П., Каримова Л. З. Продуктивность ячменя в зависимости от фонов питания и нормы высева. Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2019;(3(54)):67–70. DOI: https://doi.org/10.12737/article_5db95a9da9c1c0.43759300 EDN: BYHLBO

13. Дериглазова Г. М., Лазарев В. И., Минченко Ж. Н. Эффективность основных приемов и способов возделывания ярового ячменя в условиях ЦЧР. Достижения науки и техники АПК. 2023;37(7):34–38. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54674131> EDN: XXGKNG
14. Куркова И. В., Кузнецова А. С. Влияние сроков посева и норм высева на урожайность ярового ячменя сорта Амур. Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). 2016;(2(39)):17–21. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=wqrvf> EDN: WQRVF
15. Левакова О. В. Отзывчивость нового сорта ярового ячменя Знатный на норму высева в условиях Рязанской области. Аграрная наука. 2021;(3):70–73. DOI: <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2021-346-3-70-73> EDN: TTFQGE
16. Каримова Л. З., Сафин Р. И., Таланов И. П. Влияние пред посевной обработки семян и нормы высева на формирование урожая и пораженность растений ячменя корневыми гнилями. Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2015;(1(29)):21–25. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23887716> EDN: UCTCPB
17. Кузикеев Ж. В., Борадулина В. А., Мусалитин Г. М., Кузикеева А. П. Реакция сортов ячменя на нормы высева и уровень азотного питания на выщелоченных черноземах алтайского Приобья. Достижения науки и техники АПК. 2020;(7(34)):27–31. DOI: <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2020-10704> EDN: CSNCWX
18. Дурнев Г. И. Научный анализ проблем и достижений при возделывании сельскохозяйственных культур в России. Вестник Орловского государственного аграрного университета. 2007;(3(6)):14–19. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12963826> EDN: KXRWOX
19. Политыко П. М., Киселев Е. Ф., Капранов В. Н., Мерзлякин А. С., Посметный Р. С., Абрамова Н. А., Ерошенко Л. М., Табунщик Л. Ф., Беленикин С. В., Прокопенко А. Г., Матюта С. В., Кондратенко О. П., Федорищев В. Н., Тареев А. И. Роль минеральных удобрений и средств защиты растений в формировании урожайности и качества зерна сортов ярового ячменя (*Hordeum vulgare* L.) при разных технологиях возделывания на дерново-подзолистых почвах. Проблемы агрохимии и экологии. 2017;(2):13–18. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29763505> EDN: ZBIENX
20. Алехин В. Т., Михайликова В. В., Михина Н. Г. Экономические пороги вредоносности вредителей, болезней и сорных растений в посевах сельскохозяйственных культур. М.: Росинформагротех, 2016. 73 с.

References

1. Yakushev V. P., Mikhaylenko I. M., Dragavtsev V. A. Reserves of agro-technologies and breeding for cereal yield increasing in the Russian Federation. *Sel'skokhozyaystvennaya biologiya* = Agricultural Biology. 2015;50(5):550–560. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2015.5.550rus>
2. Surin N. A., Gerasimov S. A., Bobrovskiy A. V., Kryuchkov A. A. Development of varietal agrotechnics elements for cereals in the Krasnoyarsk territory. *Zemledelie*. 2021;(7):22–25. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24412/0044-3913-2021-7-22-25>
3. Zotikov V. I., Polukhin A. A., Gryadunova N. V. Development of innovative technologies in crop production based on breeding achievements. *Zernobobovye i krupyanye kul'tury* = Legumes and Groat Crops. 2023;(2(46)):5–9. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24412/2309-348X-2023-2-5-9>
4. Lyalina E. V., Boldyrev S. V., Pomortsev A. A. Current state of the genetic polymorphism in spring barley (*Hordeum vulgare* L.) from Russia assessed by the alleles of hordein-coding loci. *Genetika* = Russian Journal of Genetics. 2016;52(6):650–663. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.7868/S0016675816060072>
5. Kokina L. P., Shehekleina L. M., Kunilova A. V. Sources of valuable breeding traits and their use in creation of barley varieties adapted to conditions of Volga-Vyatka region. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2017;(3):9–14. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2017.58.3.09-14>
6. Filippov E. G., Bragin R. N., Dontsov D. P. Analysis of adaptability indicators of spring barley varieties and lines in the ecological variety testing. *Tavrisheskiy vestnik agrarnoy nauki* = Taurida herald of the agrarian sciences. 2022;(4(32)): 221–230. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49982577>
7. Zhuchenko A. A. Ways of innovative and adaptive development of the Russian agro-industrial complex in the XXI century. Kirov: *NIISKh Severo-Vostoka*, 2011. 143 p.
8. Shpanev A. M., Fesenko M. A., Smuk V. V. Efficiency of the chemical means complex use for the spring barley cultivation in the North-West Russia. *Agrokimiya*. 2019;(12):47–55. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.1134/S0002188119120093>
9. Sedyakov M. V. Influence of agrotechnological techniques on economically valuable features of a new promising line of spring barley L-1800. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Izvestiya Saint-Petersburg State Agrarian University. 2021;(1(62)):59–67. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24412/2078-1318-2021-1-59-67>
10. Shpanev A. M. Effect of nitrogen fertilizer doses on the effectiveness of herbicidal treatment in grain crops in the North-West of the Russian Federation. *Agrokimiya*. 2021;(10):74–80. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002188121100136>

11. Vladimirov V. P., Gareev I. R., Bizyanov S. Ya. Productivity and quality of barley grain depending on seeding rates and the calculated doses of fertilizers in conditions of forest-steppe of the middle Volga region. *Vestnik Chuvashskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii* = Vestnik Chuvash State Agricultural Academy. 2019;(3(10)):21–26. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17022/800m-6792>
12. Talanov I. P., Karimova L. Z. Barley productivity depending on nutrition background and seeding rate. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Vestnik of the Kazan State Agrarian University. 2019;(3(54)):67–70. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.12737/article_5db95a9da9c1c0.43759300
13. Deriglazova G. M., Lazarev V. I., Minchenko Zh. N. The effectiveness of the main cultivation techniques and methods of spring barley under the conditions of the Central Chernozem region. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK* = Achievements of Science and Technology of AICis. 2023;37(7):34–38. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54674131>
14. Kurkova I. V., Kuznetsova A. S. Influence of seedtime and seed rate on the cropfield of Amur spring barley. *Vestnik NGAU (Novosibirskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet)* = Bulletin of NSAU (Novosibirsk State Agrarian University). 2016;(2(39)):17–21. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=wigrvf>
15. Levakova O. V. Responsiveness of a new variety of spring barley Notable to the seeding rate in the Ryazan region. *Agrarnaya nauka* = Agrarian science. 2021;(3):70–73. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2021-346-3-70-73>
16. Karimova L. Z., Safin R. I., Talanov I. P. Effect of presowing seed treatment and seeding rate on yield formation and incidence of barley by root rot. *Vestnik Ulyanovskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii* = Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy. 2015;(1(29)):21–25. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23887716>
17. Kuzikeev Zh. V., Boradulina V. A., Musalitin G. M., Kuzikeeva A. P. The reaction of barley varieties to seeding rates and the level of nitrogen nutrition in the leached chernozems of Altai Ob region. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK* = Achievements of Science and Technology of AICis. 2020;(7(34)):27–31. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2020-10704>
18. Durnev G. I. Scientific analysis of problems and achievements in the cultivation of agricultural crops in Russia. *Vestnik Orlovskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2007;(3(6)):14–19. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12963826>
19. Polityko P. M., Kiselev E. F., Kapranov V. N., Merzlikin A. S., Posmetnyy R. S., Abramova N. A., Eroshenko L. M., Tabunshchik L. F., Belenikin S. V., Prokopenko A. G., Matyuta S. V., Kondratenko O. P., Fedorishchev V. N., Tareev A. I. Role of mineral fertilizers and plants protection means in the formation of productivity and grain quality of spring barley (*Hordeum vulgare* L.) varieties cultivated by different technologies at soddy-podsolic soils. *Problemy agrokhimii i ekologii*. 2017;(2):13–18. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29763505>
20. Alekhin V. T., Mikhaylikova V. V., Mikhina N. G. Economic thresholds of harmfulness of pests, diseases and weeds in crops. Moscow: *Rosinformagrotekh*, 2016. 73 p.

Сведения об авторах

✉ **Фесенко Мария Александровна**, кандидат с.-х. наук, ведущий научный сотрудник, ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт», Гражданский проспект, 14, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 195220, e-mail: office@agrophys.ru, e-mail: ramylek@yandex.ru

Шпанев Александр Михайлович, доктор биол. наук, главный научный сотрудник, ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт», Гражданский проспект, 14, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 195220, e-mail: office@agrophys.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4346-318X>

Information about the authors

✉ **Maria A. Fesenko**, PhD in Agricultural Science, leading researcher, Agrophysical Research Institute, Grazhdansky pr., 14, Saint-Petersburg, Russian Federation, 195220, e-mail: office@agrophys.ru, e-mail: ramylek@yandex.ru

Alexander M. Shpanev, DSc in Biology, chief researcher, Agrophysical Research Institute, Grazhdansky pr., 14, Saint-Petersburg, Russian Federation, 195220, e-mail: office@agrophys.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4346-318X>

✉ – Для контактов / Corresponding author

Наследование основных элементов продуктивности и параметров адаптивности у диаллельных гибридов яровой мягкой пшеницы

© 2024. Л. В. Волкова✉, О. С. Амунова

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

В условиях Кировской области проведено сравнительное изучение 20 гибридных популяций F_2 , F_3 , F_4 , созданных по полной диаллельной схеме, и 5 родительских форм яровой мягкой пшеницы по признакам продуктивности и адаптивности. В контрастные по тепло- и влагообеспеченности 2020–2022 гг. (гидротермический коэффициент 1,07–1,44) у родительских форм и гибридов выявлено доминирующее влияние генотипа на признак «масса 1000 зерен», условий среды – на признаки «число зерен в колосе» и «урожайность». В группе гибридов отмечено возрастание доли взаимодействия «генотип × среда» по всем показателям. Наблюдали переопределение корреляционных связей между признаками в зависимости от влияния лимитирующих факторов, а также ежегодную смену рангов гибридных комбинаций как по средним значениям признаков, так и по проявлению гетерозиса и депрессии. Приведена характеристика исходных сортов и гибридных популяций по параметрам пластичности и стабильности, изучены закономерности наследования адаптивных реакций. Реакция на условия среды по признаку «число зерен в колосе» наследовалась в основном по промежуточному типу, большинство высокопластичных генотипов получены с участием сортов Маргарита и Линия 2, низкопластичных – с участием Саратовская 29. Процентное распределение типа реакции признака «масса 1000 зерен» происходило в сторону увеличения числа высокопластичных комбинаций, по урожайности – соответственно распределению родительских форм. Включение в скрещивания исходной формы Карабалыкская 98 повышало у гибридов коэффициент регрессии признака «масса 1000 зерен», сорта Маргарита – признака «урожайность». Выявлена высокая сходимость среднего уровня признаков, уровня гетерозиса и значений коэффициента пластичности в гибридных популяциях, и относительная независимость показателя «фенотипическая стабильность» (S_p). Пластичность урожайности в значительной степени зависела от пластичности признака «число зерен в колосе», при этом большее влияние оказывали материнские компоненты. В результате исследований выделены лучшие комбинации, из которых предпочтительнее вести отборы на основные элементы продуктивности и параметры адаптивности при селекции яровой мягкой пшеницы.

Ключевые слова: *Triticum aestivum* L., сорт, гибридная комбинация, число зерен в колосе, масса 1000 зерен, урожайность, комбинационная способность, гетерозис, пластичность, стабильность

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

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Волкова Л. В., Амунова О. С. Наследование основных элементов продуктивности и параметров адаптивности у диаллельных гибридов яровой пшеницы. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2024;25(3):340–354. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.3.340-354>

Поступила: 11.04.2024

Принята к публикации: 21.05.2024

Опубликована онлайн: 26.06.2024

Inheritance of the main elements of productivity and adaptability parameters in diallelic hybrids of spring soft wheat

© 2024. Lyudmila V. Volkova✉, Oksana S. Amunova

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

In the conditions of the Kirov region, there was conducted a comparative study of 20 hybrid populations of F_2 , F_3 , F_4 , created according to a complete diallel scheme, and 5 parent forms of spring soft wheat by the traits of productivity and adaptability. In contrast in terms of heat and moisture supply in 2020–2022 (hydrothermal coefficient 1.07–1.44) in parental forms and hybrids the dominant influence of the genotype on the trait "weight of 1000 grains", environmental conditions on the trait "number of grains per spike" and "yield" was revealed. In the group of hybrids, an increase in the proportion of "genotype × environment" interaction was noted in all indicators. There was a redefinition of correlations between traits depending on the influence of limiting factors, as well as an annual change in the ranks of hybrid combinations both in terms of average values of traits and in the manifestation of heterosis and depression. The characteristics of the initial varieties and hybrid populations according to the parameters of plasticity and stability are given, the patterns of inheritance of adaptive reactions are studied. The reaction to environmental conditions based on the "number of grains per spike" trait was inherited mainly by an intermediate type, most high-plastic genotypes were obtained with the participation of 'Margarita' and 'Liniya 2' cultivars, low-plastic ones with the participation of the Saratovskaya 29 cultivar. The percentage distribution of the type of reaction of the "weight of 1000 grains" trait occurred towards an increase in the number of high-plastic combinations, by the yield – according to the

distribution of parent forms. The inclusion of the original 'Karabalykskaya 98' form in crosses increased the regression coefficient of the "1000 grain weight" trait in hybrids, and the 'Margarita' cultivar increased the "yield" trait. The high convergence of the average level of traits, the level of heterosis and the values of the plasticity coefficient in hybrid populations, and the relative independence of the indicator "phenotypic stability" (S, %) were revealed. Yield plasticity largely depended on the plasticity of the "number of grains per spike" trait, while the maternal components had a greater influence. As a result of the research, the best combinations have been identified, from which it is preferable to conduct selections for the main elements of productivity and adaptability parameters in the selection of spring soft wheat.

Keywords: *Triticum aestivum* L., cultivar, hybrid combination, number of grains per ear, weight of 1000 grains, yield, combinative ability, heterosis, plasticity, stability

Acknowledgements: the research was carried out under the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of Federal Agricultural Research Centre of the North-East named N.V. Rudnitsky (theme No. FNWE-2022-0007).

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: Volkova L. V., Amunova O. S. Inheritance of the main elements of productivity and adaptability parameters in diallelic hybrids of spring wheat. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2024;25(3):340–354. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.3.340-354>

Received: 11.04.2024

Accepted for publication: 21.05.2024

Published online: 26.06.2024

По прогнозам экспертов ФАО¹, из-за увеличения населения планеты и роста потребления к 2050 году следует нарастить глобальное производство продовольствия на 60 % в основном за счет повышения урожайности. При этом производство пшеницы уже к 2030 году необходимо увеличить как минимум на 50 % [1]. Несмотря на общий положительный тренд, межгодовые колебания урожаев становятся все выше, что в целом рассматривается как негативное явление. Объясняется это двумя основными причинами: с ростом потенциальной продуктивности сортов снижается их устойчивость; частота периодов с экстремальными погодными условиями в мире значительно возрастает [2, 3]. Полностью компенсировать влияние «капризов погоды» на эффективность растениеводства за счет техногенных средств очень трудно или практически невозможно, поэтому необходима разработка и усовершенствование методов адаптивной селекции [4, 5]. При этом подчеркивается важность сочетания в одном генотипе продуктивности и экологической стабильности [6].

Стабильность результирующего признака достигается за счет компенсации одних элементов продуктивности другими. Генетические линии, отобранные по относительной стабильности урожайности, могут обладать высокой фенотипической пластичностью ее элементов, поэтому изучение степени вариабельности основных показателей продуктивности в разных средах имеет огромное значение [7, 8]. Вторым

важным моментом в селекции на экологическую устойчивость является выбор исходного материала для скрещиваний, который основывается на анализе адаптивных реакций [9]. Установлено, что способность реагировать на средовые сигналы обусловлена генетически, т. е. пластичность фенотипических признаков может передаваться по наследству [10, 11]. Это подтверждается историей создания сортов интенсивного типа [12].

Генетическая основа пластичности может быть независимой от среднего значения признаков [13]. Некоторыми авторами показана возможность комбинирования показателей высокой адаптивности и продуктивности в одном генотипе [14, 15]. Вместе с тем имеются сообщения о том, что высокая фенотипическая вариабельность признаков в различных средах может ограничивать урожай, поскольку для производства и поддержания пластической реакции требуется много энергии [7, 16]. Рекомбинация генетически разнородных по уровню признаков и адаптивным реакциям форм по схеме диаллельных скрещиваний позволяет создавать гибридные популяции, несущие весь фонд генов и их сочетаний. Оценка адаптивной и комбинационной способности исходного материала, а также степени проявления репродуктивного и адаптивного гетерозиса у гибридов поможет понять механизмы передачи признаков и возможного их сочетания для увеличения резерва продуктивности и выносливости к стрессовым условиям среды.

¹Ганенко И. Агросектор замедляется. ОЭСР-ФАО обновили сельскохозяйственный прогноз. Агроинвестор. 2022;(9). URL: <https://www.agroinvestor.ru/analytics/article/38763-agrosektor-zamedlyatsya-oesr-fao-obnoviliselskokhozyaystvennyy-prognoz/>

Цель исследования – определение комбинационной способности исходных сортов яровой мягкой пшеницы, изучение наследования продуктивности и адаптивных реакций у диаллельных гибридов; выделение гибридных комбинаций, сочетающих высокую продуктивность с пластичностью и фенотипической стабильностью.

Научная новизна – в специфичных для Кировской области условиях вегетационного периода изучены сорта и гибридные популяции яровой мягкой пшеницы по элементам продуктивности и адаптивным реакциям, получены уникальные, перспективные для селекции генотипы.

Материал и методы. Исследования проводили на опытном поле ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока (г. Киров) с участием 20 гибридных популяций, полученных по полной схеме диаллельных скрещиваний. В качестве родительских форм использовали сорта: Линия 2 (Россия, Иркутская обл.), Саратовская 29 (Россия, Саратовская обл.), Карабалыкская 98 (Казахстан), Маргарита (Россия, Ульяновская обл.), Баженка (Россия, Кировская обл.). Гибридизацию проводили в 2018 г., гибридное поколение F_1 выращивали в 2019 г., полевые исследования родительских сортов и гибридных популяций F_2 , F_3 , F_4 выполняли соответственно в 2020...2022 гг. Размещение вариантов систематическое, в двух повторениях, площадь делянок 0,5 м², норма высева 300 всхожих семян/м². Посев проводили сеялками СКС-6-10, уборку – вручную с подсчетом количества продуктивных стеблей. После обмолота определяли урожайность, число зерен в колосе, массу 1000 зерен.

Для статистической обработки данных использовали корреляционный и двухфакторный дисперсионный анализы². Оценку эффектов общей комбинационной способности (ОКС) признаков у родительских форм проводили согласно методическим рекомендациям В. Г. Вольфа с соавт.³. Вклад факторов в формирование урожайности определяли по Н. А. Плохинскому⁴. Параметры пластичности (b_i) и стабильности (S , %) определяли по S. A. Eberhart, W. A. Russel⁵, истинный гетерозис – согласно

методике Д. С. Омарова⁶. Частоту гетерозиса оценивали как отношение комбинаций с гетерозисом к общему числу комбинаций.

Погодные условия в годы проведения исследований существенно различались по температурному режиму и количеству осадков. Вегетационные периоды 2019 и 2020 гг. (ГТК⁷ = 1,30 и 1,38 соответственно) в целом были благоприятными для формирования высокой урожайности пшеницы. Условия 2021 г. (ГТК = 1,07) отличались теплой и жаркой погодой в течение всего периода от посева до созревания, с дефицитом осадков в критический период развития (выход в трубку – колошение), что явилось причиной снижения зерновой продуктивности растений. Аномально холодная и влажная погода мая 2022 г. замедлила наступление начальной фазы развития растений и спровоцировала развитие корневых гнилей, что привело к изреживанию всходов. Вегетативный период развития пшеницы характеризовался избытком осадков и недостатком эффективных температур, генеративный период – жаркой засушливой погодой. Гидротермический коэффициент в целом за вегетацию 2022 года составил 1,44. Таким образом, лимитирующие урожайность факторы в большей мере проявлялись в период закладки зерен в колосе, в меньшей степени – в период налива зерна.

Результаты и их обсуждение. Основной особенностью адаптивной селекции является ее экологическая и региональная направленность, поэтому необходим учет лимитирующих урожайность факторов. Доля вклада генотипа в конкретный признак определяет успех селекции в самых «узких» местах – отборах из ранних гибридных поколений. Наличие сильных взаимодействий генотипа со средой приводит к смещению рангов в изучаемом наборе сортов и вызывает большие затруднения у селекционеров, поскольку отбор в одних условиях не может обеспечить преимущества в других. Актуальным также является вопрос – влияет ли гетерозиготное состояние организма на приспособительные возможности по сравнению с исходными родительскими формами?

²Доспехов Б. А. Методика полевого опыта. М.: Колос, 1979. 416 с.

³Вольф В. Г., Литун П. П., Хавелова А. В., Кузьменко Р. И. Методические рекомендации по применению математических методов для анализа экспериментальных данных по изучению комбинационной способности. Харьков, 1980. 76 с.

⁴Плохинский Н. А. Руководство по биометрии для зоотехников. М.: Колос, 1969. 256 с.

⁵Eberhart S. A., Russel W. A. Stability parameters for comparing varieties. Crop Sci. 1966;(6(1)):36–40.

⁶Омаров Д. С. К методике учета и оценки гетерозиса у растений. Сельскохозяйственная биология. М.: Колос, 1975. С. 123–127.

⁷Мировой агроклиматический справочник. Сост. Г. Т. Селянинов и др. Л.-М.: Гидрометеиздат, 1937. 428 с.

У изучаемых родительских форм наибольшую долю в фенотипической вариации признака «число зерен в колосе» имела среда, однако влияние генотипа и его взаимодействие со средой также были существенными. Показатель «масса 1000 зерен» на 81,0 % обус-

лавливался влиянием генотипа, варьирование по годам отсутствовало. Значительная изменчивость среднего группового значения признака «урожайность» ($CV = 34,3 \%$) показала определяющую роль внешней среды, влияние генотипа было незначимым (табл. 1).

Таблица 1 – Сезонная вариабельность признаков у родительских форм и гибридов яровой мягкой пшеницы /

Table 1 – Seasonal variability of traits in parental forms and hybrids of spring soft wheat

Признак / Trait	Значение признака / Meaning of trait				CV, %	Вклад фактора, % / Contribution of factor, %		
	2020 г.	2021 г.	2022 г.	среднее / average		A	B	A×B
	F ₂	F ₃	F ₄					
Число зерен в колосе, шт. / Number of grains per spike, pcs.	33.6 34,4	23.2 22,8	22.4 23,1	26.4 26,8	19.7 21,2	7.3* 6,0	75.2* 67,0*	8.0* 12,6*
Масса 1000 зерен, г / Weight of 1000 grains, g	43.0 44,6	43.0 42,9	43.0 43,5	43.0 43,3	0.0 2,1	81.0* 56,8*	0.0 6,8*	7.1 18,6*
Урожайность, г/м ² / Grain yield, g/m ²	426.2 460,7	243.8 244,4	196.4 215,6	288.9 306,9	34.3 35,6	11.0 7,4*	59.2* 69,0*	12.5 10,9*

Примечания: числитель – среднее групповое значение у сортов ($n = 5$), знаменатель – среднее групповое значение у гибридных популяций ($n = 20$); фактор А – генотип, фактор В – среда, А×В – взаимодействие «генотип×среда»; * значимо при $p \leq 0,05$ /

Notes: numerator – the average group value of the varieties ($n = 5$), denominator – the average group value in hybrid populations ($n = 20$); factor A – genotype, factor B – environment, A×B – interaction "genotype×environment"; * significant at $p \leq 0.05$.

В группе гибридов влияние генотипа на признак «масса 1000 зерен» было несколько ниже, чем у родителей, влияние среды – значимо выше. Повторяемость признака в трех смежных поколениях была достоверно высокой ($r = 0,53^* \dots 0,79^*$, $n = 20$). Число зерен в колосе и урожайность в большей степени зависели от погодных условий (67,0...69,0 %), чем от генотипа (6,0...7,4 %); наблюдали значительные изменения рангов генотипов по данным признакам в зависимости от смены лимитирующих факторов. Коэффициент корреляции между поколениями F₂, F₃, F₄ изменялся от слабо положительных до достоверно отрицательных значений ($r = 0,39 \dots -0,49^*$). Обращает на себя внимание более значимое влияние взаимодействия «генотип×среда» у гибридов по сравнению с родителями, т. е. отборы на разных фонах могут иметь неодинаковую эффективность. Так, парная связь показателя «число зерен в колосе» между поколениями F₃ (лимитирующий фактор – засуха в период формирования колоса) и F₄ (переувлажнение, грибные болезни) принимала достоверно отрицательное значение. Таким образом, если условия отклонены от оптимальных, отбор лучших гибридных популяций по этому признаку может стать безрезультатным.

Изменения условий в вегетативную фазу развития растений послужили причиной сдвигов

корреляций внутри триады признаков «число зерен в колосе», «масса 1000 зерен», «урожайность». Связь урожайности и массы 1000 зерен у родительских сортов была высокой во все годы исследований, что подтверждается достоверными значениями генотипической корреляции ($r_g = 0,973^*$). Корреляционная связь между признаками «урожайность» и «число зерен в колосе» в отдельных случаях была слабая положительная, связь средних значений – слабая отрицательная (рис. 1).

В гибридных популяциях второго и четвертого поколений структура корреляционных связей была схожей: в относительно засушливый 2021 год связь признаков «урожайность» и «масса 1000 зерен» возростала, «урожайность» и «число зерен в колосе» – снижалась (рис. 2).

Достоверная положительная связь между признаками «урожайность» и «озерненность колоса» отмечена лишь в поколении F₄, а генотипическая связь (между средними трехлетними значениями) была очень слабая. Парные фенотипические корреляции между признаками «число зерен в колосе» и «масса 1000 зерен» были незначимыми, т. е. в рамках анализируемых популяций в конкретных средовых условиях данные признаки формировались независимо друг от друга, и отборы по одному из них не сопровождалось бы изменением другого.

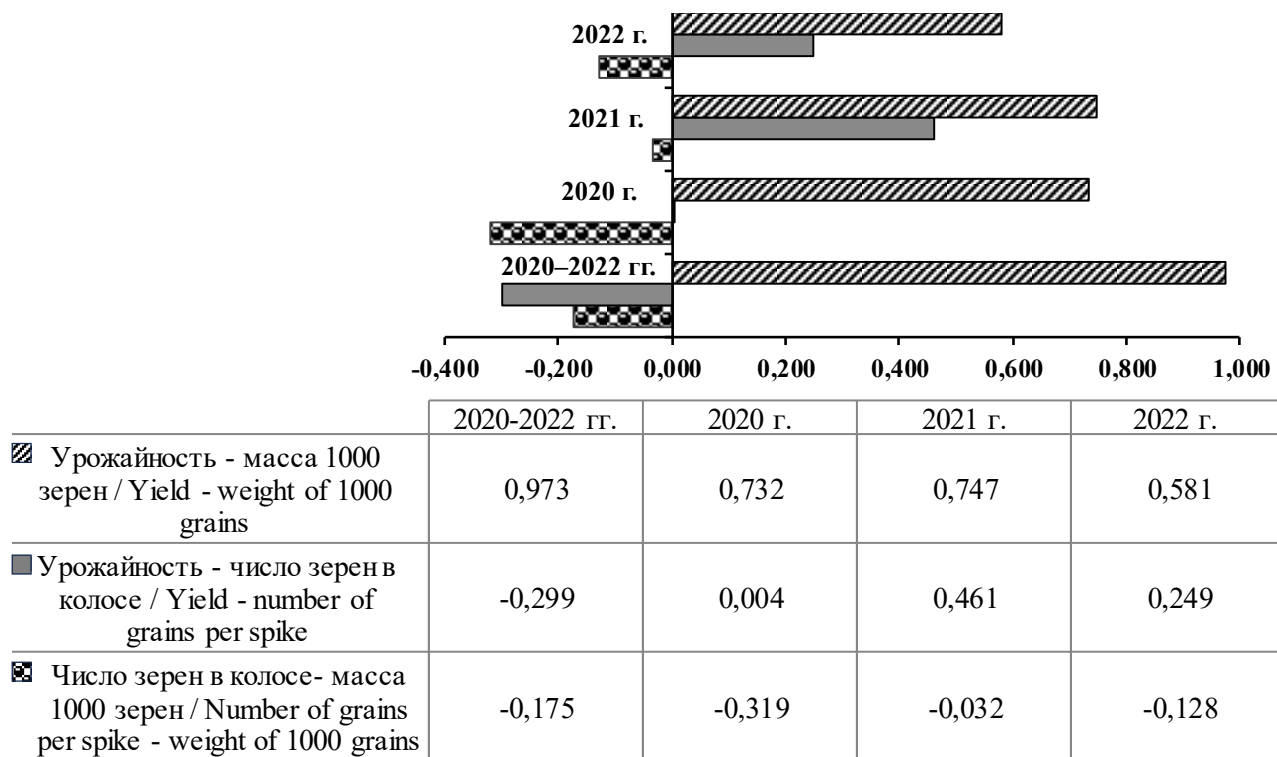


Рис. 1. Корреляционные связи (r) между признаками у родительских сортов яровой мягкой пшеницы ($n = 5$, значения $r \geq 0,878$ достоверны при уровне значимости $p \leq 0,05$) /

Fig. 1. Correlation connections (r) between traits in parental varieties of spring soft wheat ($n = 5$, r values ≥ 0.878 are significant at a significance level of $p \leq 0.05$)

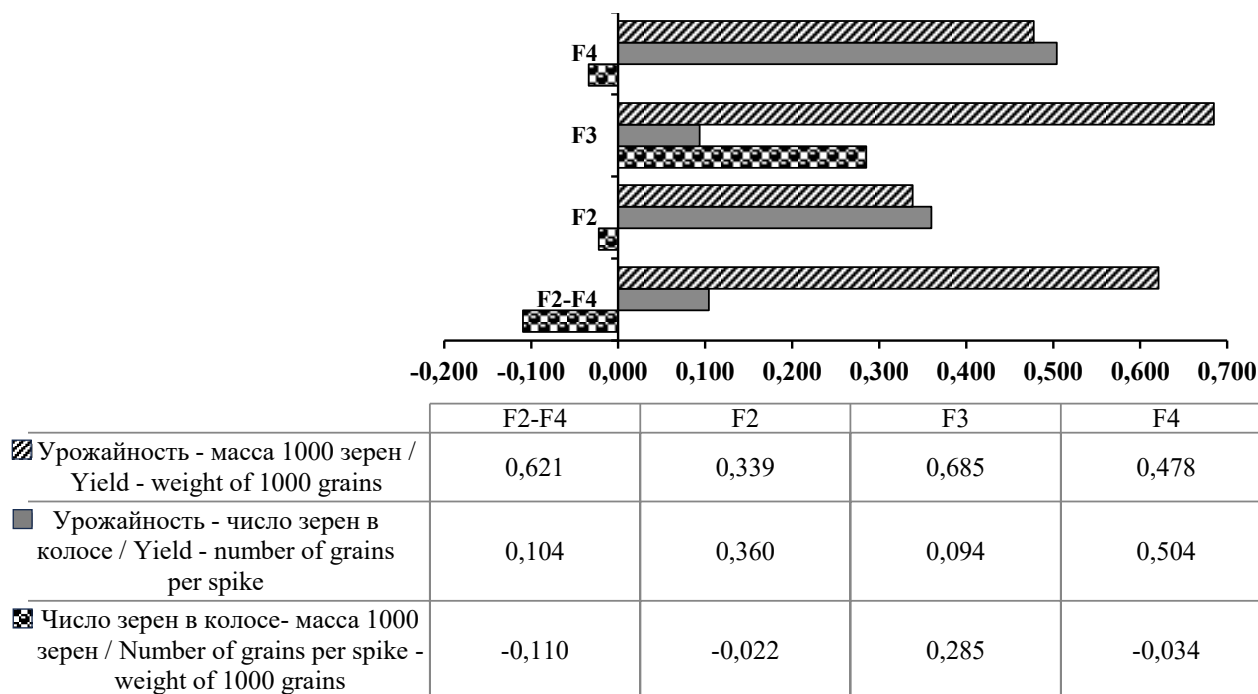


Рис. 2. Корреляционные связи (r) между признаками у гибридных популяций яровой мягкой пшеницы в ряду поколений ($n = 20$, значения $r \geq 0,444$ достоверны при уровне значимости $p \leq 0,05$) /

Fig. 2. Correlation connections (r) between traits in hybrid populations of spring soft wheat in a series of generations ($n = 20$, r values ≥ 0.444 are significant at a significance level $p \leq 0.05$)

Таким образом, хотя «число зерен в колосе» и расценивается как важный признак повышения урожайности, его селекционное улучшение может потребовать большего времени из-за высокой паратипической составляющей и слабой повторяемости в потомстве. В некоторых источниках сообщается, что связь этого признака с урожайностью носит криволинейный характер. Это позволяет предположить, что стратегия повышения продуктивности за счет увеличения озерненности колоса может быть не всегда успешной [17]. Отборы по фенотипу в неблагоприятной среде приведут к получению специфически приспособленных генотипов, которые могут не проявить себя и быть выбракованы в дальнейшем. Селекцию на высокую озерненность колоса целесообразнее проводить в более поздних поколениях в типичные, либо благоприятные по метеоусловиям годы. С другой стороны, высокая положительная связь массы 1000 зерен с урожайностью во всех поколениях гибридов, а также достоверная генотипическая корреляция указывают на возможность эффективного проведения отборов на крупность

зерна, начиная с поколения F₂. На возможность проведения отборов по признакам, обладающим высокой наследуемостью, указывают Э. Д. Неттевич с соавт. [18].

Одним из решающих условий успеха селекционной программы является подбор для гибридизации сортов, которые должны обладать значительным разнообразием по анализируемым признакам. Скрещивание двух генотипов, обладающих контрастирующими величинами признаков «число зерен в колосе» и «масса 1000 зерен», считается результативной стратегией в повышении потенциальной продуктивности. Немаловажное значение имеет способность передавать признаки потомству, т. е. обладать высокой комбинационной способностью. Вариансы ОКС, как отклонение среднего значения признака гибридов с общим родительским компонентом от общего среднего по всем гибридам, характеризуют ценность сорта как источника признака. Высокие константы ОКС обычно свидетельствуют об аддитивном эффекте генов (табл. 2).

Таблица 2 – Продуктивность и общая комбинационная способность (ОКС) родительских сортов яровой мягкой пшеницы (среднее за 2020–2022 гг.) /

Table 2 – Productivity and general combining ability (GCA) of parental varieties of spring soft wheat (average for 2020–2022)

Сорт / Cultivar	Число зерен в колосе / Number of grains per spike		Масса 1000 зерен / Weight of 1000 grains		Урожайность / Grain yield	
	шт. / pcs.	ОКС / GCA	г / g	ОКС / GCA	г/м ² / g/m ²	ОКС / GCA
Линия 2 / 'Liniya' 2	24,6	0,115	41,6	-1,192	263,9	-2,667
Саратовская 29 / 'Saratovskaya 29'	25,3	-0,491	44,3	-0,255	330,9	-7,667
Карабалыкская 98 / 'Karabalykskaya 98'	28,7	0,095	44,5	1,145*	304,0	6,415
Маргарита / 'Margarita'	25,5	-0,280	45,5	1,383*	327,2	25,972
Баженка / 'Bazhenka'	27,8	0,587*	39,0	-1,059	217,8	-22,086
Среднее по опыту / Average by the experiment	26,4	0	43,0	0	288,8	0
HCP ₀₅ / LSD ₀₅	4,0	3,770	2,8	1,110	-	-

* Значимо при $p \leq 0,05$ / It is significant at $p \leq 0.05$

В группе родительских сортов достоверные парные различия по признакам «число зерен в колосе» отмечены между Карабалыкская 98 и Линия 2, «масса 1000 зерен» значимо ниже остальных родительских форм сформировали сорта Баженка и Линия 2. Из-за высокого влияния средовых факторов не удалось определить значимых различий по урожайности, относи-

тельно высокими значениями характеризовались Саратовская 29, Маргарита и Карабалыкская 98 (на 5,3...14,6 % выше среднего в опыте). Высокий уровень признаков не всегда определял высокую комбинационную способность. Наибольшую ОКС по озерненности колоса показал сорт Баженка, по массе 1000 зерен – Маргарита и Карабалыкская 98, по урожай-

ности – Маргарита. Несмотря на высокие значения урожайности и массы 1000 зерен исходного сорта Саратовская 29, прямые и обратные гибриды с его участием, как правило, уступали остальным гибридным комбинациям. Реципрокный эффект, согласно анализу вариантов элементов продуктивности, был незначимым ($F = 1,92...2,09$), что говорит об одинаковом вкладе материнских и отцовских компонентов в формирование признаков.

Основной задачей комбинационной селекции является получение материала, не уступающего по селективируемым признакам лучшим родителям. Принято считать, что гибриды с положительным гетерозисом в первом поколении имеют преимущество в последующих. Видимый фенотипический эффект в F_1 является результатом действия очень сложных разнородных генетических процессов, при этом в каждом отдельном случае в основе гетерозиса могут лежать разные генетические вариации. Нельзя игнорировать роль взаимодействия «генотип×среда», поскольку в различных условиях среды тип наследования в конкретной гибридной комбинации может изменяться в широких пределах [19]. Поэтому с точки зрения практической селекции самоопылителей и при поиске лучших сочетаний для гибридизации важно не только выделить высокогетерозисные комбинации в первом поколении, но и определить те из них, у которых преимущество над родителями сохраняется в генерациях, из которых проводятся отборы.

Количество комбинаций, у которых величина признака «число зерен в колосе» была выше, чем у родительских форм, варьировало от 30 до 45 % в зависимости от поколения, средний процент превышения над лучшим родителем составил 7,0...26,4 % с максимумом – в первом и минимумом – в третьем поколениях. Отмечена сильная изменчивость проявления гетерозиса или депрессии при смене поколений в каждой отдельной комбинации (табл. 3).

Из 20 изучаемых комбинаций лишь одна сохраняла стабильное превосходство над родителями по признаку «число зерен в колосе» в течение четырех лет – Линия 2×Маргарита (на 0,7...22,3 %). Доля рекомбинантов, превосходящих исходные формы по массе 1000 зерен, составила 20...40 %, средний процент превышения над лучшим родителем – 3,3...7,2 %. Максимальный уровень гетерозиса также

наблюдали в поколении F_1 , минимальный – в F_3 . За годы изучения не найдено ни одной комбинации со стабильным превышением над лучшей родительской формой. Если по значениям массы 1000 зерен отмечали высокую повторяемость признака, то по уровню гетерозиса наблюдали значительную смену рангов в поколениях $F_1...F_4$. Высокая сходимость эффектов гетерозиса по массе 1000 зерен была между F_2 и F_4 ($r = 0,615^*$). В результате оценок выделилась лишь одна комбинация Маргарита × Карабалыкская 98, образованная при скрещивании крупнозерных генотипов и отличающаяся максимальной средней массой 1000 зерен (48,1 г), а также гетерозисом в трех смежных поколениях – F_2, F_3, F_4 (3,5...7,0 %).

Гетерозис по числу зерен в колосе не коррелировал с гетерозисом по массе 1000 зерен ($r = -0,10...0,16$), что дает возможность их сочетания. Для выделения лучших комбинаций использовали показатель суммы рангов, который характеризует уровень гетерозиса по двум независимым признакам во всех средах: Линия 2 × Маргарита, Маргарита × Баженка, Саратовская 29 × Маргарита, Маргарита × Карабалыкская 98 ($\Sigma = 58...66$).

Количество комбинаций, превышающих исходные формы по урожайности, составило в F_2 и F_3 – 30 %, в F_4 – 60 %, средний уровень превышения над лучшим родителем соответствовал 19,6, 12,8 и 9,9 % соответственно. При смене поколений обнаружены значительные различия по проявлению гетерозиса у одних и тех же комбинаций. Стабильно высокое превышение над лучшим родителем по урожайности в $F_2...F_4$ наблюдали в гибридной популяции Маргарита × Карабалыкская 98.

Если вопросам наследования признаков продуктивности уделяется достаточно большое внимание, то закономерности наследования адаптивных реакций до сих пор остаются малоизученными. Под пластичностью обычно понимают способность количественного признака изменяться в ответ на изменение окружающей среды. Считается, что пластичные генотипы должны иметь преимущество в приспособленности перед генотипами, которые не способны изменять свои фенотипы. Весьма актуальным считается вопрос, приводит ли скрещивание и селекция к увеличению или уменьшению пластичности признаков, а также вопрос о том, как пластичность отдельных слагаемых продуктивности влияет на изменчивость урожайности.

Таблица 3 – Изменение рангов гибридных популяций в ряду поколений яровой мягкой пшеницы по проявлению истинного гетерозиса ($H_{ист}$) /

Table 3 – The change in the ranks of hybrid populations in a number of generations of spring soft wheat by the manifestation of true heterosis (H_{true})

Сорт, гибридная популяция / Cultivar, hybrid population		Число зерен в колосе / Number of grains per spike				Масса 1000 зерен / Weight of 1000 grains				Σ
		F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	
♀ Линия 2 / 'Liniya 2'	♂ Саратовская 29 / 'Saratovskaya 29'	13	4	19	3	4	2	20	13	78
	♂ Карабалыкская 98 / 'Karabalykskaya 98'	20	16	20	11	1	10	10	8	96
	♂ Маргарита / 'Margarita'	7	2	2	9	7	8	6	17	58
	♂ Баженка / 'Bazhenka'	15	12	6	8	6	12	13	1	73
♀ Саратовская 29 / 'Saratovskaya 29'	♂ Линия 2 / 'Liniya 2'	17	1	10	6	13	19	19	16	101
	♂ Карабалыкская 98 / 'Karabalykskaya 98'	19	19	14	10	17	14	14	4	111
	♂ Маргарита / 'Margarita'	1	10	15	5	11	5	15	3	65
	♂ Баженка / 'Bazhenka'	4	15	12	1	9	11	17	7	76
♀ Карабалыкская 98 / 'Karabalykskaya 98'	♂ Линия 2 / 'Liniya 2'	16	3	17	2	20	15	7	14	94
	♂ Саратовская 29 / 'Saratovskaya 29'	6	9	11	19	19	3	16	6	89
	♂ Маргарита / 'Margarita'	9	7	18	16	10	4	3	5	72
	♂ Баженка / 'Bazhenka'	2	11	8	20	18	7	12	15	93
♀ Маргарита / 'Margarita'	♂ Линия 2 / 'Liniya 2'	14	6	4	13	5	17	9	18	86
	♂ Саратовская 29 / 'Saratovskaya 29'	5	17	7	15	14	6	5	12	81
	♂ Карабалыкская 98 / 'Karabalykskaya 98'	12	8	13	14	15	1	1	2	66
	♂ Баженка / 'Bazhenka'	8	13	1	17	3	9	2	9	62
♀ Баженка / 'Bazhenka'	♂ Линия 2 / 'Liniya 2'	10	5	3	18	2	16	4	11	69
	♂ Саратовская 29 / 'Saratovskaya 29'	18	20	5	7	16	18	18	19	121
	♂ Карабалыкская 98 / 'Karabalykskaya 98'	11	14	16	12	12	13	8	10	96
	♂ Маргарита / 'Margarita'	3	18	9	4	8	20	11	20	93
Максимальное значение $H_{ист}$, % (ранг 1) / Maximum value of H_{true} , % (rank 1)		52,3	23,5	15,3	41,7	12,3	7,0	6,7	4,2	-
Среднее значение $H_{ист}$, % / The average value of H_{true} , %		26,4	9,1	7,0	9,9	7,2	3,6	3,3	3,6	-
Частота $H_{ист}$, % / The frequency of H_{true} , %		35,0	35,0	30,0	45,0	20,0	40,0	25,0	25,0	-

Примечание: жирным шрифтом выделены комбинации с гетерозисом по отношению к лучшему родителю /
Note: Combinations with heterosis in relation to the best parent are highlighted in bold

Коэффициенты регрессии (b_i) по признаку «число зерен в колосе» у родительских сортов Линия 2 и Саратовская 29 были значимо ниже единицы, что говорит о низкой отзывчивости на среду. Сорта Маргарита и Баженка имели значения b_i , достоверно превышающие единицу. Анализ фенотипической стабильности показал, что для сортов Маргарита и Баженка

были характерны очень слабые отклонения от линии регрессии ($S \leq 2,5\%$), Линия 2 и Саратовская 29 – слабые ($5,0 \leq S \leq 2,5\%$), для сорта Карабалыкская 98 – средние ($7,5 \leq S \leq 5,0\%$). Таким образом, по признаку «число зерен в колосе» родительские компоненты значительно различались типом реакции на среду (табл. 4).

Таблица 4 – Параметры пластичности (b_i) и стабильности ($S, \%$) основных компонентов продуктивности у родительских форм и гибридов яровой мягкой пшеницы (2020–2022 гг.) /

Table 4 – Parameters of plasticity (b_i) and stability ($S, \%$) of the main components of productivity in parental forms and hybrids of spring soft wheat (2020–2022)

Сорт, гибридная популяция / Cultivar, hybrid population		Число зерен в колосе / Number of grains per spike		Масса 1000 зерен / Weight of 1000 grains		Урожайность / Grain yield	
		b_i	S	b_i	S	b_i	S
Линия 2 / 'Liniya 2'		0,71*	2,51	0,29*	1,40	0,87*	2,53
Саратовская 29 / 'Saratovskaya 29'		0,67*	3,37	-0,45*	0,02	0,68	11,10
Карабалыкская 98 / 'Karabalykskaya 98'		0,78	5,16	1,24	1,02	0,66	10,60
Маргарита / 'Margarita'		1,31**	0,66	0,77	1,21	1,68**	2,90
Баженка / 'Bazhenka'		1,31**	2,18	-1,87**	0,89	0,76	10,50
♀ Линия 2 / 'Liniya 2'	♂ Саратовская 29 / 'Saratovskaya 29'	0,89	16,03	5,29**	1,06	1,38	12,77
	♂ Карабалыкская 98 / 'Karabalykskaya 98'	0,82	11,20	1,62**	0,27	0,74*	2,87
	♂ Маргарита / 'Margarita'	1,77**	1,93	1,63	2,69	1,10	4,69
	♂ Баженка / 'Bazhenka'	1,03	1,26	0,88	2,48	0,65*	0,79
♀ Саратовская 29 / 'Saratovskaya 29'	♂ Линия 2 / 'Liniya 2'	1,29**	1,06	0,66	2,48	1,05	12,43
	♂ Карабалыкская 98 / 'Karabalykskaya 98'	0,54*	0,79	0,46	4,21	0,43*	1,73
	♂ Маргарита / 'Margarita'	1,10	6,54	2,97	4,42	1,04	23,11
	♂ Баженка / 'Bazhenka'	0,58	18,10	1,77	1,74	0,63	8,66
♀ Карабалыкская 98 / 'Karabalykskaya 98'	♂ Линия 2 / 'Liniya 2'	1,21	8,57	0,54	0,88	1,29	7,91
	♂ Саратовская 29 / 'Saratovskaya 29'	0,87	8,01	3,71**	0,37	0,41*	3,04
	♂ Маргарита / 'Margarita'	1,18**	0,38	1,34	1,32	1,15**	2,05
	♂ Баженка / 'Bazhenka'	1,10	11,16	2,97**	1,15	0,82	5,93
♀ Маргарита / 'Margarita'	♂ Линия 2 / 'Liniya 2'	1,24**	1,52	-0,60	1,50	1,33	10,93
	♂ Саратовская 29 / 'Saratovskaya 29'	0,82	5,74	1,50	1,44	0,88	13,16
	♂ Карабалыкская 98 / 'Karabalykskaya 98'	1,08	2,58	1,12	0,60	1,67**	6,09
	♂ Баженка / 'Bazhenka'	1,00	12,56	-0,54	1,92	1,48**	2,13
♀ Баженка / 'Bazhenka'	♂ Линия 2 / 'Liniya 2'	1,41	8,47	-0,93	2,83	1,25	10,05
	♂ Саратовская 29 / 'Saratovskaya 29'	0,51*	3,21	0,60	0,00	0,79	21,40
	♂ Карабалыкская 98 / 'Karabalykskaya 98'	1,01	0,40	1,24**	0,01	1,02	0,71
	♂ Маргарита / 'Margarita'	0,79	3,56	-1,22	2,82	1,26**	4,68

* Коэффициент регрессии (b_i) достоверно ниже 1; ** коэффициент регрессии (b_i) достоверно выше 1 (при $p \leq 0,05$) /

* Regression coefficient (b_i) is significantly lower than 1; ** regression coefficient (b_i) is significantly higher than 1 (at $p \leq 0.05$)

По числу зерен в колосе гибриды, образованные с участием компонента Линия 2, характеризовались большей отзывчивостью на условия: пять генотипов обладали средней реакцией (b_i значимо не отклонялось от единицы) и три комбинации относились к категории высокопластичных. Из восьми комбинаций с участием сорта Саратовская 29 две отнесены к экстенсивному типу, одна – к интенсивному. Гибриды

с сортом Карабалыкская 98 в целом характеризовались средней реакцией на среду, исключение составили две комбинации: Саратовская 29 × Карабалыкская 98 (экстенсивная форма) и Карабалыкская 98 × Маргарита (интенсивная форма). Результатом скрещиваний с сортом Маргарита стало получение трех высокопластичных по числу зерен в колосе комбинаций и пяти – со средней реакцией. Практически все

гибриды с участием сорта Баженка характеризовались средним откликом на условия среды, за исключением комбинации Баженка × Саратовская 29 (b_i значимо ниже 1). Таким образом, большинство высокопластичных по признаку «число зерен в колосе» генотипов получены

с участием сортов Маргарита и Линия 2, генотипов с низкой пластичностью – с участием сорта Саратовская 29. Общее распределение гибридов по типу реакций было следующим: 10 % – слабая; 70 % – средняя, 20 % – сильная (рис. 3).

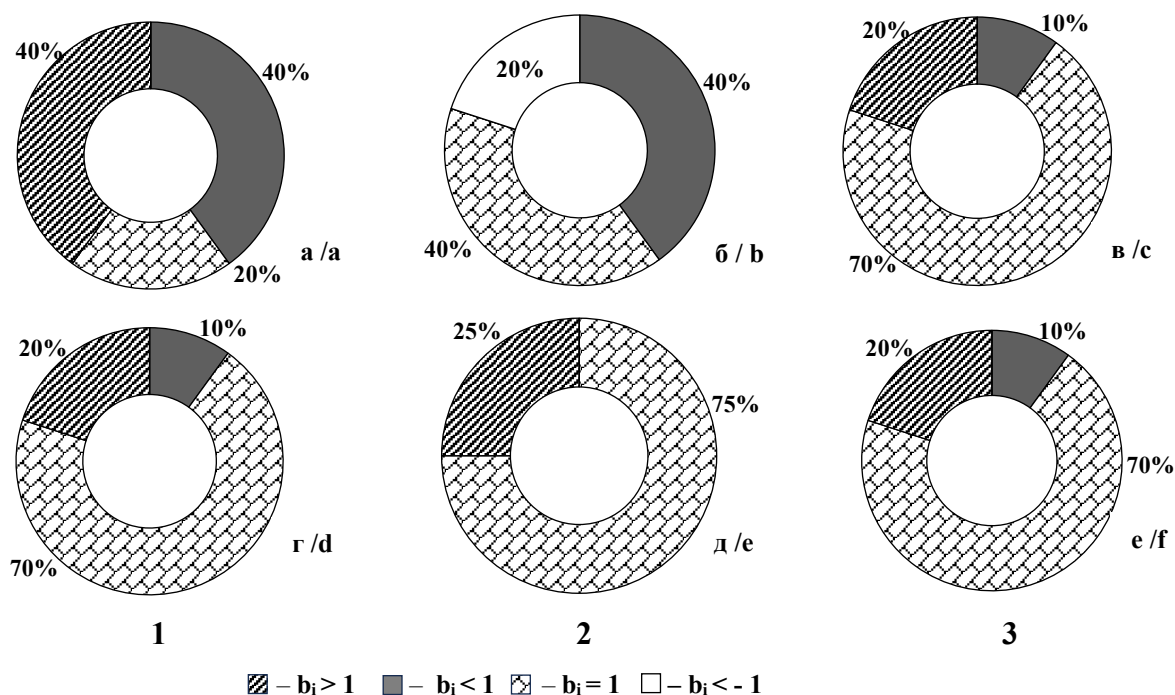


Рис. 3. Процентное распределение родительских форм ($n = 5$; а, б, в) и гибридных комбинаций ($n = 20$; г, д, е) яровой мягкой пшеницы по типу пластических реакций (b_i): 1 – число зерен в колосе; 2 – масса 1000 зерен; 3 – урожайность /

Fig. 3. Percentage distribution of parent forms ($n = 5$; a, b, c) and hybrid combinations ($n = 20$; d, e, f) of spring soft wheat by type of plastic reactions (b_i): 1 – number of grains per spike; 2 – weight of 1000 grains; 3 – grain yield

По значениям параметра стабильности распределение гибридов произошло в сторону большего разнообразия и, как правило, в сторону уменьшения стабильности, при этом все интенсивные комбинации имели высокую фенотипическую стабильность ($S \leq 2,5\%$): Линия 2 × Маргарита, Маргарита × Линия 2, Саратовская 29 × Линия 2, Карабалыкская 98 × Маргарита.

Среди родительских сортов не обнаружено генотипов с интенсивной реакцией по признаку «масса 1000 зерен». Сорта Карабалыкская 98 и Маргарита имели адекватный отклик на среду, Линия 2 характеризовалась слабой реакцией, Саратовская 29 и Баженка сформировали более высокий уровень признака при ухудшении условий выращивания (обратный наклон линии регрессии). Большинство гибридов (75 %) характеризовались средним откликом на среду. Получено пять гибридных комбинаций (25 %) с коэффициентом регрессии достоверно

выше единицы: Линия 2 × Саратовская 29, Линия 2 × Карабалыкская 98, Карабалыкская 98 × Саратовская 29, Карабалыкская 98 × Баженка, Баженка × Карабалыкская 98. Необходимо отметить, что скрещивание с сортом Карабалыкская 98, обладающим самым высоким в данном опыте значением b_i , позволило получить гибриды с повышенной фенотипической пластичностью признака «масса 1000 зерен». Компоненты Линия 2 в прямых и Саратовская 29 в обратных скрещиваниях также повышали пластичность признака. В трех комбинациях с участием сорта Баженка, имеющего достоверно отрицательное значение b_i (Маргарита × Баженка, Баженка × Маргарита, Баженка × Линия 2), наблюдали наследование схожего типа реакции. Все сорта и гибриды по признаку «масса 1000 зерен» имели слабые и очень слабые отклонения от линии регрессии, что характеризует их как фенотипически стабильные формы.

По урожайности исходные формы Линия 2 и Маргарита значимо различались между собой по уровню реакции на условия выращивания, при этом сохраняли высокую фенотипическую стабильность ($5,0 \leq S \leq 2,5$ % – слабые отклонения от линии регрессии). Остальные сорта характеризовались средней отзывчивостью с высоким разбросом значений во времени и пространстве ($S \geq 10,0$ – очень сильные отклонения от линии регрессии). Получены четыре высокопластичные по урожайности комбинации (20 % от общего числа гибридных комбинаций) и все – с участием сорта Маргарита. Две из них отличались высокой фенотипической стабильностью: Карабалыкская 98 × Маргарита и Маргарита × Баженка. Комбинации экстенсивного типа Линия 2 × Карабалыкская 98, Линия 2 × Баженка, Саратовская 29 × Карабалыкская 98, Карабалыкская 98 × Саратовская 29 образованы от сортов со слабой или средней реакцией по всем параметрам. Сорт Баженка отличался тем, что обладал высокой компенсаторной способностью элементов продуктивности: в благоприятных условиях формировал большее число зерен в колосе, но низкую массу 1000 зерен, в неблагоприятных – наоборот, пластичность результирующего признака была близка к единице. Гибриды от сорта Баженка обладали большим разнообразием пластических реакций. Распределение гибридов по типу реакций пластичности (b_i) соответствовало распределению родителей. По фенотипической стабильности (S , %) гибриды характеризовались гораздо большим разнообразием – от очень слабых до очень сильных отклонений от линии регрессии.

Анализ корреляций показал достоверную связь показателей b_i урожайности и числа зерен в колосе ($r = 0,508$), и отсутствие связи с массой 1000 зерен ($r = -0,117$). На показатель пластичности урожайности в большей степени оказывали влияние материнские компоненты ($r = 0,495$), чем отцовские ($r = 0,234$). Коэффициенты регрессии числа зерен в колосе материнских форм и регрессии урожайности гибридов также были тесно связаны ($r = 0,473$). Таким образом, использование высокоотзывчивых по числу зерен в колосе сортов в качестве материнских форм оказывало положительное влияние на уровень реакции по признаку «урожайность» у потомства.

Большой практический интерес представляет изучение взаимоотношений комбинационной и адаптивной способности, что позволяет глубже понять механизмы передачи этих признаков потомству. Средние значения признаков, как правило, были положительно связаны с комбинационной способностью у сортов и

уровнем гетерозиса у гибридов, а также с коэффициентом b_i (табл. 5).

Гибриды с гетерозисом по числу зерен в колосе и урожайности характеризовались более высоким уровнем и пластичностью этих признаков, по массе 1000 зерен такой закономерности не отмечено. Выявлена относительная независимость показателя фенотипической стабильности (S) от среднего уровня признаков и адаптивных реакций у гибридов. Отмечена тенденция снижения значения b_i по признаку «число зерен в колосе», значений b_i и ОКС по признаку «урожайность» с повышением показателя S , % у родительских сортов.

В результате изучения рекомбинантов $F_2...F_4$ по продуктивности и адаптивной способности выделены лучшие комбинации, из которых предпочтительнее проводить отборы – их высокий уровень урожайности сочетался с репродуктивным и адаптивным гетерозисом. При этом более перспективными считали гибриды с положительным гетерозисом по b_i и отрицательным – по S . Все они превышали исходные формы по урожайности, три комбинации превосходили лучшего родителя по коэффициенту регрессии, четыре – по фенотипической стабильности (табл. 6).

Конкретный способ, с помощью которого генотипы формируют высокий уровень результирующего признака в различных условиях среды, можно описать как стратегию их адаптивности. Исследование показывает, что отобранные гибриды имеют разный уровень пластических реакций как по урожайности, так и по двум ее составляющим.

Гибридная комбинация Линия 2 × Саратовская 29, образованная от скрещивания экстенсивных по всем изучаемым признакам родителей с низкой ОКС урожайности, отличалась самой высокой отзывчивостью на условия среды по признаку «масса 1000 зерен» (размах изменчивости составил 39,2...46,4 г, $b_i = 5,29$ – адаптивный гетерозис). Это привело к повышению уровня и пластичности урожайности, но вместе с тем к снижению ее фенотипической стабильности.

При скрещивании контрастных по крупности зерна, урожайности и адаптивным реакциям сортов Линия 2 и Маргарита был получен высокоурожайный гибрид с массой 1000 зерен (43,0...46,2 г), который выделился максимальным гетерозисом и значением признака «число зерен в колосе» (29,9 шт.), а также высокой отзывчивостью этого признака ($b_i = 1,77$). Реакция на среду по урожайности наследовалась по промежуточному типу и сопровождалась снижением фенотипической стабильности.

Таблица 5 – Коэффициенты корреляции между значениями признаков, параметрами адаптивности и комбинационной способностью (уровнем гетерозиса) сортов (гибридов) яровой мягкой пшеницы /
Table 5 – Correlation coefficients between the values of traits, adaptability parameters and combinational ability (level of heterosis) of varieties (hybrids) of spring soft wheat

Параметр / Parameter	Среднее значение признака / Average value of trait	b_i	S
<i>Число зерен в колосе / Number of grains per spike</i>			
b_i	$\frac{0,224}{0,575^{**}}$	-	-
S	$\frac{0,550}{-0,049}$	$\frac{-0,689}{-0,257}$	-
ОКС / GCA	$\frac{0,556}{-}$	$\frac{0,378}{-}$	$\frac{0,054}{-}$
Гетерозис / Heterosis	$\frac{-}{0,712^{**}}$	$\frac{-}{0,693^{**}}$	$\frac{-}{-0,073}$
<i>Масса 1000 зерен / Weight of 1000 grains</i>			
b_i	$\frac{0,790}{0,233}$	-	-
S	$\frac{-0,162}{-0,050}$	$\frac{0,366}{-0,220}$	-
ОКС / GCA	$\frac{0,838}{-}$	$\frac{0,721}{-}$	$\frac{0,080}{-}$
Гетерозис / Heterosis	$\frac{-}{0,331}$	$\frac{-}{-0,042}$	$\frac{-}{0,157}$
<i>Урожайность / Grain yield</i>			
b_i	$\frac{0,340}{0,652^{**}}$	-	-
S	$\frac{-0,080}{-0,107}$	$\frac{-0,718}{0,116}$	-
ОКС / GCA	$\frac{0,736}{-}$	$\frac{0,742}{-}$	$\frac{-0,503}{-}$
Гетерозис / Heterosis	$\frac{-}{0,827^{**}}$	$\frac{-}{0,669^{**}}$	$\frac{-}{-0,273}$

Примечания: числитель – родители, знаменатель – гибриды; **значимо при $p \leq 0,01$ /
Notes: numerator – parents, denominator – hybrids; **it is significant at $p \leq 0.01$

Таблица 6 – Характеристика лучших гибридных комбинаций яровой мягкой пшеницы по урожайности, уровню адаптивного и репродуктивного гетерозиса /
Table 6 – Characteristics of the best hybrid combinations of spring soft wheat according to grain yield, level of adaptability and reproductive heterosis

Гибридная комбинация / Hybrid population	Урожайность, г/м ² / Grain yield, g/m ²	Гетерозис истинный, % / True heterosis, %		
		урожайность / grain yield	b_i	S
Линия 2 × Саратовская 29 / 'Liniya 2' × 'Saratovskaya 29'	377,8	+2,1	+58,6	+15,0
Линия 2 × Маргарита / 'Liniya 2' × 'Margarita'	333,3	+2,2	-34,5	+61,7
Карабалыкская 98 × 'Линия 2 / 'Karabalykская 98' × 'Liniya 2'	334,7	+10,0	+48,3	-25,4
Карабалыкская 98 × Маргарита / 'Karabalykская 98' × 'Margarita'	358,4	+9,5	-31,5	-80,7
Маргарита × Карабалыкская 98 / 'Margarita' × 'Karabalykская 98'	391,3	+19,6	-0,59	-42,5
Баженка × Линия 2 / 'Bazhenka' × 'Liniya 2'	281,6	+6,7	+43,7	-4,3

Сорта Карабалыкская 98 и Линия 2 значительно различались по средним значениям признаков «число зерен в колосе» и «масса 1000 зерен», по показателю b_1 (слабая и средняя реакция на среду) и по фенотипической стабильности. Гибридная популяция Карабалыкская 98 × Линия 2 характеризовалась стабильно крупным зерном (42,8...43,8 г), гетерозисом по числу зерен в колосе в F_2 и F_4 и урожайности, большей, чем у родителей, стабильностью и пластичностью урожайности.

Наиболее высокопродуктивные гибриды получились при скрещивании сорта интенсивного типа Маргарита и сорта со средней реакцией Карабалыкская 98. Обе исходные формы имели достоверно высокую ОКС по массе 1000 зерен и положительную – по урожайности. Прямые и обратные гибриды с их участием формировали урожайность соответственно на 19,6 и 9,5 % выше лучшего родителя и обладали более высокой фенотипической стабильностью. Значение коэффициента регрессии урожайности было ниже, чем у исходного сорта Маргарита, но достоверно выше единицы. Гибридная популяция Маргарита × Карабалыкская 98 сформировала максимальную в опыте урожайность, массу 1000 зерен (47,6...49,0 г), отличалась гетерозисом по массе 1000 зерен в трех последовательных поколениях, начиная с F_2 .

Материнская форма Баженка характеризовалась высокой ОКС и положительной отзывчивостью на условия среды по числу зерен в колосе, в то же время достоверно отрицательными значениями b_1 по массе 1000 зерен. Образованный с экстенсивным сортом Линия 2 гибрид превышал лучшего родителя по озерненности колоса и урожайности, пластические реакции наследовались по промежуточному типу с сохранением отрицательного знака по массе 1000 зерен.

Заключение. В результате изучения родительских форм и гибридных популяций трех последовательных поколений F_2 , F_3 , F_4 яровой мягкой пшеницы выявлено достоверно высокое влияние генотипа на признак «масса 1000 зерен», условий среды – на «число зерен в колосе» и

«урожайность». В группе гибридов отмечено возрастание доли взаимодействия «генотип × среда» по всем показателям. В зависимости от проявления лимитирующих факторов отмечено переопределение корреляционных связей между признаками, а также ежегодная смена рангов гибридных комбинаций как по средним значениям признаков, так и по проявлению гетерозиса и депрессии. Высокой ОКС по числу зерен в колосе обладал сорт Баженка, по массе 1000 зерен и урожайности – сорта Маргарита и Карабалыкская 98. Выделены гибридные комбинации, сохраняющие превосходство над лучшим родителем вне зависимости от условий: Линия 2 × Маргарита (число зерен в колосе), Маргарита × Карабалыкская 98 (масса 1000 зерен, урожайность). Приведена характеристика исходных сортов и гибридов по параметрам пластичности и стабильности, изучены закономерности наследования адаптивных реакций. Пластичность признака «число зерен в колосе» наследовалась, как правило, по промежуточному типу, большинство высокопластичных генотипов получены с участием сортов Маргарита и Линия 2, генотипов с низкой пластичностью – с участием сорта Саратовская 29. Распределение по типу реакции признака «масса 1000 зерен» происходило в сторону увеличения его пластичности, признака «урожайность» – соответственно распределению родительских форм. Включение в скрещивания исходной формы Карабалыкская 98 повышало коэффициент регрессии по массе 1000 зерен, сорта Маргарита – по урожайности. Выявлена высокая сходимость среднего уровня признаков, уровня гетерозиса и значений коэффициента пластичности в гибридных популяциях, а также относительная независимость показателя фенотипической стабильности (S , %). Пластичность урожайности в значительной степени зависела от пластичности признака «число зерен в колосе», при этом большее влияние оказывали материнские компоненты. В результате исследований выделены лучшие комбинации, из которых предпочтительнее вести отборы.

Список литературы

1. Tshikunde N. M., Mashilo J., Shimelis H., Odindo A. Agronomic and physiological traits, and associated quantitative trait loci (QTL) affecting yield response in wheat (*Triticum aestivum* L.): A review. *Frontiers in Plant Science*. 2019;10:1428. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01428>
2. Новохатин В. В., Шеломенцева Т. В., Драгавцев В. А. Новый комплексный подход к изучению динамики повышения адаптивности и гомеостатичности у сортов мягкой яровой пшеницы (на примере длительной истории селекции в Северном Зауралье). *Сельскохозяйственная биология*. 2022;57(1):81–97. DOI: <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2022.1.81rus> EDN: DAYGED

3. Жученко А. А. Адаптивное растениеводство (эколого-генетические основы). Теория и практика. М.: Изд-во Агрорус, 2008. Т. I. 816 с.
4. Прянишников А. И. Научные основы адаптивной селекции в Поволжье. М.: РАН, 2018. 96 с.
Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35335295> EDN:UVHAAQ
5. Рыбась И. А. Повышение адаптивности в селекции зерновых культур. Сельскохозяйственная биология. 2016;51(5):617–626. DOI: <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2016.5.617rus> EDN: WZJQEN
6. Кильчевский А. В., Хотылева Л. В. Экологическая селекция растений. Минск: Тэхналогія, 1997. 372 с.
7. Nikotra A. B., Atkin O. K., Bonser S. P., Davidson A. M., Finnegan E. J., Mathesius U., Poot P., Purugganan M. D., Richards C. L., Valladares F., Van Kleunen M. Plant phenotypic plasticity in a changing climate. Trends in Plant Science. 2010;15(12):684–692. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2010.09.008>
8. Laitinen R. A. E., Nikoloski Z., Genetic basis of plasticity in plants. Journal of Experimental Botany. 2019;70(3):739–745. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/ery404>
9. Моргунов А. И., Наумов А. А. Селекция зерновых культур на стабилизации урожайности. М.: ВНИИТЭИагропром, 1987. 60 с.
10. Steinger T., Roy B. A., Stanton M. L. Evolution in stressful environments II: adaptive value and costs of plasticity in response to low light in *Sinapis arvensis*. Journal of Evolutionary Biology. 2003;16(2):313–323. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1420-9101.2003.00518.x>
11. Andreou G. M., Messer M., Tong H., Nikoloski Z., Laitinen R. A. E. Heritability of temperature-mediated flower size plasticity in *Arabidopsis thaliana*. Quantitative Plant Biology. 2023;4:e4. DOI: <https://dx.doi.org/10.1017/qpb.2023.3>
12. Новохатин В. В. Обоснование генетического потенциала у интенсивных сортов мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.). Сельскохозяйственная биология. 2016;51(5):627–635. DOI: <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2016.5.627rus> EDN: WZJQEX
13. Kusmec A., Srinivasan S., Nettleton D., Schnable P. S. Distinct genetic architectures for phenotype means and plasticities in *Zea mays*. Nature Plants. 2017;3:715–723. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41477-017-0007-7>
14. Чернова В. Л., Скрипка О. В., Подгорный С. В., Самофалов А. П., Громова С. Н. Сравнительная оценка урожайности, массы 1000 и натурной массы зерна сортов озимой мягкой пшеницы по параметрам экологической пластичности и стабильности. Аграрная наука. 2022;(6):76–79. DOI: <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2022-360-6-76-79> EDN: SXXERF
15. Тулякова М. В., Баталова Г. А., Салтыков С. С., Пермякова С. В. Урожайность и адаптивная способность образцов овса пленчатого в условиях Кировской области. Таврический вестник аграрной науки. 2023;(1(33)):125–134. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.7898532> EDN: IHSVJI
16. Zhai Yi., Lv Y., Li X., Wu W., Bo W., Shen D., Xu F., Pang X., Zheng B., Wu R. A synthetic framework for modeling the genetic basis of phenotypic plasticity and its costs. New Phytologist. 2014;201(1):357–365. DOI: <https://doi.org/10.1111/nph.12458>
17. Bustos-Korts D., Hasan A. K., Reynolds M., Calderini D. Combining high grain number and weight through a DH-population to improve grain yield potential of wheat in high-yielding environments. Field Crops Research. 2013;145:106–115. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.01.015>
18. Неттевич Э. Д., Сергеев А. В., Лызлов Е. В. Селекция яровой пшеницы, ячменя и овса (в Нечерноземной зоне). М.: Россельхозиздат, 1970. 192 с.
19. Хотылева Л. В., Кильчевский А. В., Шапуренко М. Н. Теоретические аспекты гетерозиса. Вавиловский журнал генетики и селекции. 2016;20(4):482–492. DOI: <https://doi.org/10.18699/VJ16.174> EDN: WMUFWX

References

1. Tshikunde N. M., Mashilo J., Shimelis H., Odindo A. Agronomic and physiological traits, and associated quantitative trait loci (QTL) affecting yield response in wheat (*Triticum aestivum* L.): A review. Frontiers in Plant Science. 2019;10:1428. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01428>
2. Novokhatin V. V., Shelomentseva T. V., Dragavtsev V. A. A novel integrative approach to study the dynamics of an increase in common spring wheat adaptivity and homeostaticity (on the example of breeding programs in the Northern Trans-Ural). *Sel'skokhozyaystvennaya biologiya* = Agricultural Biology. 2022;57(1):81–97. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2022.1.81rus>
3. Zhuchenko A. A. Adaptive crop production (ecological and genetic foundations). Theory and practice. Moscow: *Izd-vo Agrorus*, 2008. Vol. I. 816 p.
4. Pryanishnikov A. I. The scientific foundations of adaptive breeding in the Volga region. Moscow: *RAN*, 2018. 96 p. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35335295>
5. Rybas' I. A. Breeding grain crops to increase adaptability. *Sel'skokhozyaystvennaya biologiya* = Agricultural Biology. 2016;51(5):617–626. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2016.5.617rus>
6. Kil'chevskiy A. V., Khotyleva L. V. Ecological plant breeding. Minsk: *Tekhnologiya*, 1997. 372 p.

7. Nikotra A. B., Atkin O. K., Bonser S. P., Davidson A. M., Finnegan E. J., Mathesius U., Poot P., Puruganan M. D., Richards C. L., Valladares F., Van Kleunen M. Plant phenotypic plasticity in a changing climate. *Trends in Plant Science*. 2010;15(12):684–692. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2010.09.008>
8. Laitinen R. A. E., Nikoloski Z., Genetic basis of plasticity in plants. *Journal of Experimental Botany*. 2019;70(3):739–745. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/ery404>
9. Morgunov A. I., Naumov A. A. Breeding of grain crops to stabilize yields. Moscow: *VNIITElagroprom*, 1987. 60 p.
10. Steinger T., Roy B.A., Stanton M. L. Evolution in stressful environments II: adaptive value and costs of plasticity in response to low light in *Sinapis arvensis*. *Journal of Evolutionary Biology*. 2003;16(2):313–323. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1420-9101.2003.00518.x>
11. Andreou G. M., Messer M., Tong H., Nikoloski Z., Laitinen R. A. E. Heritability of temperature-mediated flower size plasticity in *Arabidopsis thaliana*. *Quantitative Plant Biology*. 2023;4:e4. DOI: <https://dx.doi.org/10.1017/qpb.2023.3>
12. Novokhatin V. V. The theoretical justification of intensive genetic potential of the varieties of soft wheat. *Sel'skokhozyaystvennaya biologiya = Agricultural Biology*. 2016;51(5):627–635. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2016.5.627rus>
13. Kusmec A., Srinivasan S., Nettleton D., Schnable P. S. Distinct genetic architectures for phenotype means and plasticities in *Zea mays*. *Nature Plants*. 2017;3:715–723. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41477-017-0007-7>
14. Chernova V. L., Skripka O. V., Podgornyy S. V., Samofalov A. P., Gromova S. N. Comparative estimation of productivity, 1000-kernel weight and grain nature weight of the winter common wheat varieties according to the parameters of ecological adaptability and stability. *Agrarnaya nauka = Agrarian science*. 2022;(6):76–79. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2022-360-6-76-79>
15. Tulyakova M. V., Batalova G. A., Saltykov S. S., Permyakova S. V. Productivity and adaptive ability of filmy oat samples under conditions of the Kirov region. *Tavricheskiy vestnik agrarnoy nauki = Taurida herald of the agrarian sciences*. 2023;(1(33)):125–134. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.7898532>
16. Zhai Yi., Lv Y., Li X., Wu W., Bo W., Shen D., Xu F., Pang X., Zheng B., Wu R. A synthetic framework for modeling the genetic basis of phenotypic plasticity and its costs. *New Phytologist*. 2014;201(1):357–365. DOI: <https://doi.org/10.1111/nph.12458>
17. Bustos-Korts D., Hasan A. K., Reynolds M., Calderini D. Combining high grain number and weight through a DH-population to improve grain yield potential of wheat in high-yielding environments. *Field Crops Research*. 2013;145:106–115. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.01.015>
18. Nettevich E. D., Sergeev A. V., Lyzlov E. V. Breeding of spring wheat, barley and oats (in the Non-Chernozem zone). Moscow: *Rossel'khozizdat*, 1970. 192 p.
19. Khotyleva L. V., Kilchevskiy A. V., Shapurenko M. N. Theoretical aspects of heterosis. *Vavilovskiy zhurnal genetiki i seleksii = Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2016;20(4):482–492. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18699/VJ16.174>

Сведения об авторах

✉ **Волкова Людмила Владиславовна**, кандидат биол. наук, старший научный сотрудник, зав. лабораторией, 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/0000-0002-0837-8425>, e-mail: volkovkirov@mail.ru

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

Information about the authors

✉ **Lyudmila V. Volkova**, PhD in Biology, senior researcher, Head of the Laboratory, 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/0000-0002-0837-8425>, e-mail: volkovkirov@mail.ru

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

✉ – Для контактов / Corresponding author

Перспективная сортопопуляция клевера лугового для северного земледелия

© 2024. Е. Г. Арзамасова✉, Е. В. Попова, О. А. Онучина, И. В. Шихова
ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого», г. Киров, Российская Федерация

В ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока создана новая сортопопуляция клевера лугового ГПФ-49-3, перспективная для использования в сельскохозяйственном производстве северных регионов европейской части Российской Федерации. Характеризуется ранними сроками укосной и уборочной спелости: продолжительность вегетационного периода от весеннего отрастания до фазы цветения первого укоса составляет 56–72 дня, от первого до второго укосов – 39–56 дней, до созревания семян – 103–115 дней. По результатам изучения и оценки в нескольких циклах конкурсного и экологического испытаний (2009–2021 гг.) в условиях Кировской области ГПФ-49-3 показала преимущества перед районированным сортом-стандартом Дымковский по ряду продуктивных признаков и адаптивных качеств: отличается зимостойкостью, толерантностью к засухе, высокими показателями продуктивности и её потенциалом – урожайностью зелёной массы до 88,3 т/га, семян до 5,3 ц/га; сбором сухого вещества до 20,5 т/га, сырого белка до 2,5 т/га. Особенности сортопопуляции ГПФ-49-3 являются достоверно высокая в сравнении со стандартом кормовая продуктивность травостоев второго года пользования (г. п.) – 28,7 т/га зелёной массы, 7,8 т/га сухого вещества при уровне сорта Дымковский – 23,4 и 6,2 т/га соответственно ($НСР_{05} = 4,5$ и $0,8$ т/га) и генетически обусловленная устойчивость к корневым гнилям. Обнаружена корреляционная связь (r) средней силы между интенсивностью развития корневых гнилей в 1 г. п. и показателями продуктивности растений во 2 г. п.: зелёной массой ($-0,43$), сухим веществом ($-0,50$), сбором белка ($-0,58$), свидетельствующая о том, что травостой с меньшей степенью поражения корней перед перезимовкой более продуктивен на следующий год пользования. Полученные результаты исследований позволили принять решение о передаче сортопопуляции ГПФ-49-3 в 2021 г. на государственное сортоиспытание как сорт клевера лугового Малахит.

Ключевые слова: *Trifolium pratense* L., селекция, сортоиспытание, зимостойкость, кормовая/семенная продуктивность, устойчивость к корневым гнилям

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

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Арзамасова Е. Г., Попова Е. В., Онучина О. Л., Шихова И. В. Перспективная сортопопуляция клевера лугового для северного земледелия. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2024;25(3):355–367.

DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.3.355-367>

Поступила: 25.03.2024

Принята к публикации: 15.05.2024

Опубликована онлайн: 26.06.2024

A promising variety population of meadow clover for northern agriculture

© 2024. Ekaterina G. Arzamasova✉, Eugenia V. Popova, Olga L. Onuchina, Irina V. Shihova

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

A new variety population of meadow clover GPF-49-3, promising for use in agricultural production in the northern regions of the European part of the Russian Federation (RF), has been created in the Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky. It is characterized by early periods of mowing and harvesting ripeness: the duration of the growing season from spring regrowth to the flowering phase of the first mowing is 56–72 days, from the first to the second mowing is 39–56 days, until the seeds ripen 103–115 days. According to the results of the study and evaluation in several cycles of competitive and environmental tests (2009–2021) in the conditions of the Kirov region, GPF-49-3 has shown advantages over the zoned standard cultivar (st.) ‘Dymkovsky’ in a number of productive features and adaptive qualities: it is characterized by winter hardiness, tolerance to drought, high productivity and its potential – harvesting of green mass up to 88.3 t/ha, dry matter up to 20.5 t/ha, crude protein up to 2.5 t/ha, seed yield up to 5.3 c/ha. The features of the GPF-49-3 cultivar population are significantly high in comparison with the standard forage productivity of the second year of use (y.u.) – 28.7 t/ha of green mass, 7.8 t/ha of dry matter at the level of standard ‘Dymkovsky’ cultivar – 23.4 and 6.2 t/ha, respectively ($LSD_{05} = 4.5$ and 0.8 t/ha), and genetically determined resistance to root rot. A correlation (r) of average strength was found between the intensity of root rot development in 1 y.u. and plant productivity indicators in 2 y.u.: green mass (-0.43), dry matter (-0.50), protein collection (-0.58), indicating that the herbage with a lower degree of root damage before overwintering is

more productive for the next year of use. The obtained research results made it possible to make a decision on the transfer of the GPF-49-3 cultivar population to the state cultivar testing in 2021, as a cultivar of meadow clover 'Malakhit'.

Keywords: *Trifolium pratense* L., breeding, cultivar testing, winter hardiness, feed/seed productivity, resistance to root rot

Acknowledgements: the research was carried out under the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky (theme No. FNWE-2022-0007).

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

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

For citations: Arzamasova E. G., Popova E. V., Onuchina O. L., Shihova I. V. A promising cultivar population of meadow clover for northern agriculture. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2024;25(3):355–367. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.3.355-367>

Received: 25.03.2024

Accepted for publication: 15.05.2024

Published online: 26.06.2024

Север европейской части Российской Федерации занимает обширную территорию Нечернозёмной зоны, включающую Северный (1), Северо-Западный (2) и Волго-Вятский (4) регионы¹. Ведущие направления сельскохозяйственного производства – молочное, молочно-мясное скотоводство, зерновое хозяйство и кормопроизводство, которое объединяет и поддерживает необходимый баланс отраслей, обеспечивает и даёт огромные преимущества их развитию [1, 2, 3].

Основной кормовой травянистой бобовой культурой в данных регионах является клевер луговой (*Trifolium pratense* L.), обладающий ценными биологическими особенностями и универсальными хозяйственно полезными свойствами для северного земледелия: отличается относительно высокой холодо- и морозостойкостью, произрастает на дерново-подзолистых почвах с низким плодородием и на осушенных торфяниках, характеризуется высокой потенциальной продуктивностью и питательной ценностью, обеспечивая низкозатратное производство растительного белка, равномерность и продолжительность поступления корма в системе зелёного и сырьевого конвейеров в течение всего летнего периода [4, 5, 6]. Кроме того, благодаря уникальной способности к созданию симбиотических ассоциаций с азотфиксирующими бактериями, клевер луговой участвует в решении проблемы деградации почв, повышения их плодородия и сохранения экологии агроландшафтов [7, 8]. В последнее время средоулучшающая роль клевера в агроэкосистемах становится всё более актуальной ввиду усиленной антропогенной деятельности, наблюдаемой по всему миру [9, 10, 11].

В Кировской области доля клевера лугового в чистом виде и травосмесей с его участием в сеяных сенокосах составляет 72 и 50 % от общей площади укосов и посева соответственно (по данным филиала ФГБУ «Российский сельскохозяйственный центр» по Кировской области на 1 июля 2023 г.). Посевы культуры в Архангельской области занимают до половины площадей, отведённых под многолетние травы [12]. В Псковской области клевер луговой имеет наибольшее распространение среди многолетних бобовых видов на естественных угодьях и широко используется при создании культурных травостоев [13].

Как показывает практика, за счёт внедрения в производство новых селекционных сортов можно повысить продуктивность кормовых угодий на 25–30 %, при этом важным условием является экологический принцип подбора с учётом региональных лимитирующих факторов [14]. Для северных регионов нашей страны – это неблагоприятные условия перезимовки (следствием которых становится вымерзание, выпревание, выпирание, вымокание растений) и вегетационного периода (недостаток тепла, возврат холодов, ранние осенние заморозки, нестабильная влагообеспеченность территорий, преобладание кислых почв, незначительная мощность гумусового слоя, низкая обеспеченность элементами минерального питания), что существенно влияет на специфику растениеводства, в том числе на подбор культур и сортов для создания кормовой базы [15]. В связи с этим для северного кормопроизводства особое значение имеют раннеспелые сорта клевера,

¹В соответствии с Государственным реестром селекционных достижений, допущенных к использованию в РФ, к Северному региону допуска (1) относятся Архангельская и Мурманская области, республики Коми и Карелия, Северо-Западному (2) – Вологодская, Калининградская, Костромская, Ленинградская, Новгородская, Псковская, Тверская и Ярославская области, Волго-Вятскому (4) – Кировская, Нижегородская, Свердловская области, Пермский край, республики Удмуртская, Чувашская, Марий Эл.

способные за более короткий вегетационный период в полной мере реализовать свой продуктивный потенциал и обеспечить семенное воспроизводство [16, 17].

Селекцию экологически специализированных сортов клевера лугового для условий Евро-Северо-Востока Нечернозёмной полосы России с 1924 г. осуществляет ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока [18]. Из 13 сортов, ранее включенных в Государственный реестр селекционных достижений РФ², 6 относятся к раннеспелому двуукосному типу и благодаря высокой адаптивности к различным условиям выращивания имеют широкий ареал распространения, большинство из них районированы по всем трём регионам, относящимся к зоне европейского севера (1, 2, 4) – это сорта Трио (1995 г.), Мартум (1999 г.), Кудесник (2002 г.), Кретуновский (2003 г.), Грин (2010 г.), Шанс (2017 г.).

В настоящее время селекционерами ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока созданы новые раннеспелые селекционные сорта, которые имеют перспективу для изучения в системе государственного сортоиспытания и районирования в северных регионах европейского Нечерноземья России [19, 20].

Цель исследований – анализ и оценка перспективной сортопопуляции клевера лугового ГПФ-49-3 по комплексу продуктивных признаков и адаптивных качеств.

Научная новизна – в результате селекционной работы создана и передана на государственное сортоиспытание новая сортопопуляция клевера лугового ГПФ-49-3 (Малахит) раннего срока укосной и уборочной спелости, сочетающая высокую продуктивность кормовой массы с устойчивостью/толерантностью к региональным стрессовым факторам европейского Северо-Востока России.

Материал и методы. Исследования выполнены в отделе многолетних трав ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока (г. Киров, п. Фалёнки). Селекционная работа по формированию сортопопуляции ГПФ-49-3 проведена в 1983–1999 гг.

Исходным материалом для гибридизации послужили раннеспелые зарубежные сортообразцы (Германия, Латвия) из коллекции ФИЦ «ВИР им. Н. И. Вавилова», местные сорта из Кировской области и Республики Коми. На этапах селекции были применены различные методы: искусственная гибридизация между лучшими биотипами с кастрацией материнских форм, индивидуально-семейственный отбор, поликросс, отбор устойчивых к фузариозу генотипов с последующим скрещиванием в камере искусственного климата, рекуррентный биотипический отбор на полевом искусственном инфекционном фузариозном фоне, созданном на основе смеси грибов *F. oxysporum*, *F. sambucinum*, *F. culmorum*, *F. gibbosum*.

Оценку сортопопуляции ГПФ-49-3 по комплексу хозяйственно-биологических признаков осуществляли в цикле сортоиспытаний с 2000 по 2021 год. Закладку питомников конкурсного (КСИ) и экологического (ЭСИ) сортоиспытаний (2008–2019 гг.) проводили на полях селекционного севооборота с типичными для региона почвами: дерново-подзолистыми легко- и среднесуглинистыми, от сильно- до слабокислых ($pH_{\text{сол.}}$ – 3,9–5,6 ед., ГОСТ Р 58594-2019³), слабо- или малогумусированных – 1,85–2,91 % (по Тюрину, ГОСТ 26213-2021⁴), с различной обеспеченностью подвижными формами элементов минерального питания – от слабой до очень высокой: P_2O_5 – 61–590, K_2O – 72–256 мг/кг почвы (по Кирсанову, ГОСТ Р 54650-2011⁵) (табл. 1).

Беспокровный посев делянок проводили во второй-третьей декадах мая селекционной сеялкой СКС-6-10, гектарная норма высева для учёта кормовой продуктивности – 7 млн, семенной – 4,5 млн всхожих семян. Учётная площадь делянки 10 м² (укосы), 30 м² (семена), повторность пятикратная, размещение делянок рендомизированное. Режим использования травостоев – двухлетний. Стандартом служил районированный сорт клевера лугового двуукосного Дымковский.

²Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию. Т. 1. «Сорта растений» (официальное издание). М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2023. 631 с.

URL: <https://gossortrf.ru/publication/reestry.php>

³ГОСТ Р 58594-2019. Почвы. Метод определения обменной кислотности (официальное издание).

М: Стандартинформ, 2019. 6 с. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/71986/>

⁴ГОСТ 26213-2021. Почвы. Методы определения органического вещества (официальное издание).

М: Российский институт стандартизации, 2021. 8 с. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200180714>

⁵ГОСТ Р 54650-2011. Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО (официальное издание). М: Стандартинформ, 2019. 8 с.

URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/52221/>

Таблица 1 – Агрохимические показатели пахотного слоя (0–20 см) дерново-подзолистых почв на опытных участках /

Table 1 – Agrochemical indicators of the arable layer (0–20 cm) of sod-podzolic soils in experimental plots

Год посева / Year of sowing	pH_{KCl}	Гумус, % / Humus, %	P_2O_5	K_2O
			мг/кг почвы / mg/kg of soil	
г. Киров (КСИ) / Kirov (Competitive cultivar testing)				
2008	3,9–4,7	1,86–2,91	98–590	112–256
2011	4,2–5,6	1,85–2,75	120–356	123–255
2014	4,3–4,9	2,27–2,35	61–358	72–171
2019	4,3–4,4	2,27–2,51	132–179	144–197
п. Фалёнки (ЭСИ) / Falenki (Environmental cultivar testing)				
2017	4,9	2,2	316	183

Селекционная и научно-исследовательская работа выполнена в соответствии с методиками ФНЦ «ВИК им. В. Р. Вильямса»⁶, ФИЦ «ВИР им. Н. И. Вавилова»⁷, государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур⁸.

Биохимический анализ определения качества кормовой массы, агрохимический анализ почвы осуществляли в аналитической лаборатории ФАНЦ Северо-Востока, лаборатории агрохимии и качества зерна Фалёнской селекционной станции (ФСС) – филиале ФАНЦ Северо-Востока. Статистическая обработка результатов исследований проведена методами корреляционного, вариационного и дисперсионного анализов по Б. А. Доспехову⁹ с использованием пакета селекционно-ориентированных программ AGROS v. 2.07 и прикладных программ Microsoft Office Excel 2007.

Ввиду длительности селекционного процесса испытание новой сортопопуляции проходило в разнообразных (от критических в отдельные периоды до благоприятных) погодных условиях вегетации, что позволило наиболее полно выявить норму реакции признаков и объективно оценить её адаптивные и продуктивные качества: засушливыми (ГТК = 0,82...1,00) были условия вегетации в 2010, 2013, 2016, 2021 гг., слабозасушливыми (ГТК = 1,21...1,26) – в 2015, 2018, 2020 гг., достаточное увлажнение (ГТК = 1,35) отмечалось в 2012 г., избыточное (ГТК = 1,64; 2,17) – в 2009 и 2019 гг. (табл. 2).

Условия для перезимовки клевера лугового в годы изучения также были различными – от малоблагоприятных (оттаивание/промерзание почвы на глубине залегания корневой шейки, быстро нарастающий снежный покров на непромёрзшей почве или его малая высота, образование ледяной корки и др.) в отдельные месяцы осенне-зимнего периода (октябрь–декабрь 2009 г., ноябрь–декабрь 2010 г., декабрь 2011 г., январь, ноябрь 2012 г., март 2013 г.) до удовлетворительных и благоприятных.

Результаты и их обсуждение. По результатам многолетних исследований в КСИ (посев 2008, 2011, 2014, 2019 гг.) и ЭСИ (посев 2017 г.) сортопопуляция ГПФ-49-3 показала преимущества перед ст. Дымковский по комплексу продуктивных признаков и адаптивных качеств [19].

Сортопопуляция ГПФ-49-3 относится к раннеспелому типу. В зависимости от условий тепло- и влагообеспеченности продолжительность вегетации от весеннего отрастания (третья декада апреля) до первого укоса (фаза начала цветения) составляет 56–72 дня, от первого до второго укоса – 39–56 дней. Семенной травостой достигает уборочной спелости в первой половине августа – на 103–115 день от начала вегетации (табл. 3). Скороспелость популяции позволяет получать два полноценных укоса за летний период и обеспечивает созревание семенного травостоя в благоприятные для уборки сроки.

⁶Методические указания по иммунологической оценке и созданию селекционного материала клевера лугового, устойчивого к склеротинию и фузариозу. М.: ВНИИК, 1984. 58 с.; Методические указания по селекции многолетних трав. М.: ВНИИК, 1985. 188 с.; Методические рекомендации по изучению устойчивости кормовых культур к возбудителям грибных болезней на полевых искусственных инфекционных фонах. М.: ВНИИК, 1999. 39 с.; Методические указания по селекции и первичному семеноводству клевера. М.: ВНИИК, 2002. 72 с.

⁷Широкий унифицированный классификатор СЭВ рода *Trifolium* L. Л.: ВИР, 1983. 28 с.

⁸Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. М.: ФГБУ «Госсорткомиссия», 2019. 329 с. URL: https://gossortrf.ru/upload/2019/08/metodica_1.pdf

⁹Доспехов Б. А. Методика полевого опыта. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.

Таблица 2 – Метеорологические условия периодов вегетации в годы испытания сортопопуляции клевера лугового ГПФ-49-3

Table 2 – Meteorological conditions of the growing seasons during the years of testing the GPF-49-3 meadow clover cultivar population

Год изучения / Year of study	Сумма температур выше 10 °С на 31 августа / The sum of temperatures above 10 °C on August 31	Сумма осадков, мм / Total precipitation, mm		ГТК* / НТС	
		май-август / May-August	% к норме / % to normal	по месяцам / by months	май-август / May-August
г. Киров (КСИ) / Kirov (Competitive cultivar testing)					
2009	1838	309	99	0,9/2,3/1,2/2,0	1,64
2010	2234	223	71	0,8/2,4/0,1/0,5	0,88
2012	1963	300	94	0,5/2,0/1,7/0,9	1,35
2013	2011	193	60	0,5/0,8/1,1/0,9	0,82
2015	1855	297	93	0,6/1,2/2,0/0,9	1,21
2016	2174	218	68	0,7/0,4/1,8/0,7	0,98
2020	1838	291	91	1,1/0,8/1,6/1,3	1,25
2021	2174	251	87	0,8/1,1/1,6/0,5	1,00
п. Фалёнки (ЭСИ) / Falenki (Environmental cultivar testing)					
2018	1689	253	98	1,9/1,5/1,2/0,9	1,26
2019	1617	374	144	0,7/2,4/1,4/4,4	2,17

*ГТК (гидротермический коэффициент по Селянинову¹⁰) по месяцам: май/июнь/июль/август /

*(Selyaninov hydrothermal coefficient) by months: May/June/July/August

Таблица 3 – Даты наступления укосной и уборочной спелости у сортопопуляции клевера лугового ГПФ-49-3 в КСИ (2009–2021 гг.)

Table 3 – Dates of mowing and harvest ripeness for cultivar population of GPF-49-3 meadow clover in Competitive cultivar testing (2009–2021)

Сорт / Cultivar	Первый укос / First cutting		Второй укос / Second cutting		Уборка / Harvesting	
	дата / date	период ¹ / period	дата / date	период ² / period	дата / date	период ¹ / period
ГПФ-49-3 / GPF-49-3	17 июня–2 июля / June 17–July 2	56–72	31 июля–29 августа / July 31–August 29	39–56	30 июля–14 августа / July 30–August 14	103–115
Дымковский (ст.) / 'Dymkovsky' (st.)	23 июня–6 июля / June 23–July 6	62–76	6–31 августа / August 6–31	39–56	3–24 августа / August 3–24	105–120
± к ст. / ± to st.	-	-12...-3	-	-3...+7	-	-10...0

Примечания: ¹продолжительность периода от весеннего отрастания до начала цветения травостоя (первый укос) или созревания семян (уборка); ²продолжительность периода от послеуборочного отрастания до начала цветения травостоя второго укоса, дни /

Notes: ¹duration of the period from spring regrowth to the beginning of grass flowering (first cutting) or seed ripening (harvesting); ²duration of the period from post-cut regrowth to the beginning of flowering of the grass stand of the second cut, days

Зимостойкость является лимитирующим фактором для районирования и внедрения в производство новых сортов клевера в северных регионах, поскольку она определяет продуктивность травостоя. Ввиду биологических особенностей у клевера лугового существует генетически обусловленная отрицательная корреляционная зависимость между скороспелостью и зимостойкостью: растения ранне-

спелого типа менее зимостойки, и на первоначальных этапах селекции создание скороспелых зимостойких сортов было затруднено [5]. Однако, как показала практика, в ходе селекционной работы данная связь успешно преодолевается – районированные раннеспелые сорта клевера лугового селекции ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока характеризуются хорошей зимостойкостью¹¹.

¹⁰Селянинов Г. Т. О сельскохозяйственной оценке климат. Труды по сельскохозяйственной метеорологии. Л., 1928. Вып. 20. С. 165–177.

¹¹Каталог сортов многолетних трав селекции ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока и Фаленской селекционной станции. Киров: ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока, 2018. 16 с.

В большинстве лет испытаний зимостойкость сортопопуляции ГПФ-49-3 была высокой (78–88 %) или очень высокой (94–100 %); исключение составил 2010 г., когда сохранность растений третьего года жизни (г. ж.) после второй перезимовки у сорта и стандарта была на уровне 65 % вследствие неблагоприятных условий предшествующего осенне-зимнего периода: с октября до третьей декады декабря 2009 г. наблюдалась аномально тёплая погода, снежный покров неоднократно образовывался и полностью сходил, его высота не превышала 1–10 см, промерзание почвы было слабое (8 см),

что приводило к усилению метаболических процессов в растениях и дополнительному расходованию запасных питательных веществ.

На формирование укосной массы клевера лугового существенное влияние оказывают условия тепло- и влагообеспеченности (ГТК) вегетационного периода: в наших исследованиях коэффициент корреляции со значениями ГТК = 0,87 по зелёной массе и 0,76 – по сухому веществу. У сортопопуляции ГПФ-49-3 наиболее продуктивными по сбору зелёной массы были травостой в годы с ГТК $\geq 1,35$ – 71,0 т/га (2009) и 88,3 т/га (2012) (рис. 1).



Рис. 1. Урожайность зелёной массы (т/га) у сортопопуляции клевера лугового ГПФ-49-3 в КСИ (*значение достоверно выше стандарта при $P \geq 0,95$) /
Fig. 1. Productivity of green mass (t/ha) in the cultivar population of GPF-49-3 meadow clover in Competitive cultivar testing (*the value is significantly higher than the standard at $P \geq 0,95$)

Средняя урожайность зелёной массы в 1 г. п., когда клевер луговой достигает биологического максимума своего развития, была высокой и равной со стандартом – 69,4 т/га. Травостой 2 г. п. во все годы испытаний формировались в засушливых условиях вегетации ($ГТК \leq 1$), поэтому сбор кормовой массы значительно уступал уровню 1 г. п. и составил 28,7 т/га у сортопопуляции ГПФ-49-3 – на 5,3 т/га выше показателей ст. Дымковский, причём достоверное превышение фиксировалось в годы с острым дефицитом влаги в отдельные периоды вегетации (2010, 2016, 2021 гг.), что характеризует новую сортопопуляцию как более толерантную к засухе в сравнении со стандартом. В среднем за годы изучения ГПФ-49-3 обеспечила урожайность зелёной массы 49,1 т/га – на 1,9 т/га больше стандарта.

Сбор сена (сухого вещества) определяется по показателю выхода (%) воздушно-сухой массы

из зелёной: чем выше данный показатель, тем более продуктивный травостой. Существенное влияние оказывают факторы внешней среды и фаза развития растений на дату укоса. Учёт кормовой продуктивности осуществляли в начале цветения травостоев; процентное содержание сухого вещества у сортопопуляции ГПФ-49-3 варьировало от 17,6 до 32,2 %, в среднем 24,6 % – на уровне ст. Дымковский (24,7 %). При этом сбор сухого вещества в среднем за годы испытаний был достоверно выше стандарта – 11,3 т/га (прибавка 0,8 т/га, $НСР_{05} = 0,6$ т/га) (рис. 2).

В 1 г. п. сбор сена с 1 га травостоев новой сортопопуляции и стандарта находился на одном уровне – в среднем 14,7 т, потенциал продуктивности (20,5 т/га) зафиксирован в 2012 г. Отличительной особенностью ГПФ-49-3 является достаточно высокая для засушливых условий вегетации продуктивность травостоев 2 г. п. – в среднем 7,8 т/га; во все годы испытаний она

значимо превышала стандарт со сбором сухого вещества 6,2 т/га ($НСР_{05} = 0,8$ т/га). По годам пользования урожайность сена новой сортопопуляции значительно варьировала в первый год – 11,5–20,5 т/га (коэффициент вариации

(CV) = 22 %) и в меньшей степени во второй год – 6,4–8,4 т/га (CV = 10 %). В разрезе 8 лет испытаний данный показатель был более стабильным у сортопопуляции ГПФ-49-3 (CV = 38 %), чем у ст. Дымковский (CV = 45 %).

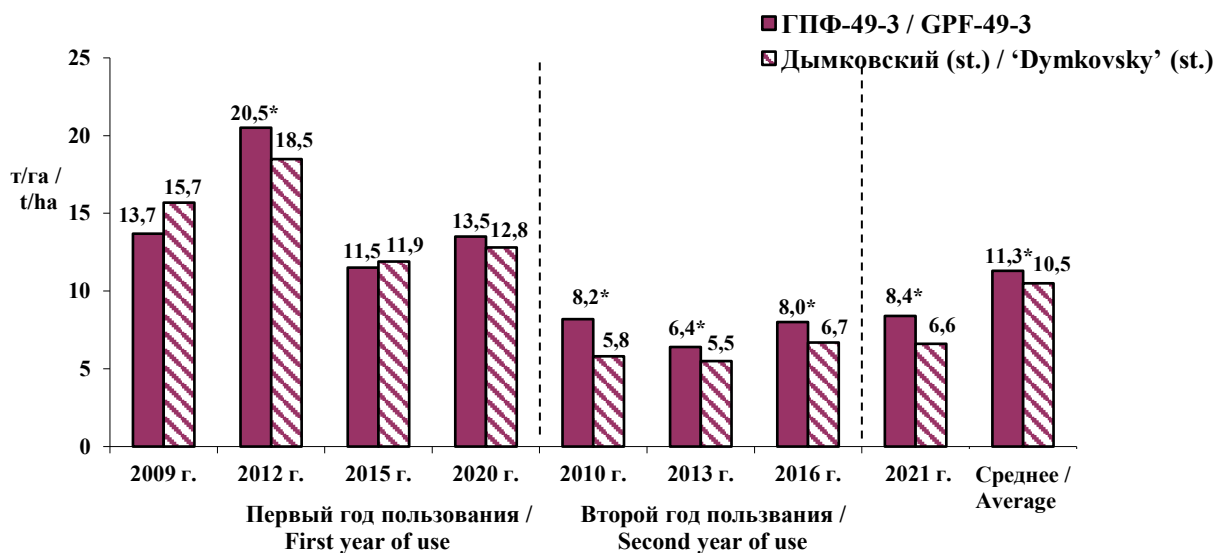


Рис. 2. Сбор сухого вещества (т/га) у сортопопуляции клевера лугового ГПФ-49-3 в КСИ (*значение достоверно выше стандарта при $P \geq 0,95$) /

Fig. 2. Dry matter collection (t/ha) from cultivar population of GPF-49-3 meadow clover in Competitive cultivar testing (*the value is significantly higher than the standard at $P \geq 0.95$)

Помимо высокой продуктивности сорта клевера лугового должны характеризоваться хорошим качеством корма. Одной из основных качественных характеристик является показатель «облиственность растений», определяемый как процентное соотношение фракции «листья» к общей массе воздушно-сухого вещества. В листьях концентрация сырого белка, каротина, жира, некоторых минеральных элементов в 2–3 раза, витаминов в 5–10 раз выше по сравнению со стеблями [4], соответственно, чем больше облиственность, тем выше питательная ценность корма. Облиственность сопряжена с высотой растений обратной корреляционной зависимостью – чем выше растение, тем меньше массовая доля листьев на нём: в наших исследованиях $r = -0,86$. Облиственность растений первого укоса у сортопопуляции ГПФ-49-3 в большинстве лет соответствовала градациям «средняя» (42,2–50,2 %) или «высокая» (54,2–57,1 %) при высоте растений 56,6–88,5 см, низкий показатель (34,4 %) отмечен в 2020 г., когда высота растений была максимальной (92,8 см) за весь период наблюдений. Во вторую укосную спелость сортопопуляция ГПФ-49-3 формировала высокооблиственный травостой

(55,8–68,1 %) высотой 36,9–67,1 см.

Важным показателем питательной ценности клевера лугового, как кормовой бобовой культуры, является содержание (%) сырого белка, которое определяет его сбор в укосной массе. Известно, что наибольшая концентрация протеина, зола и жира отмечена в фазу «бутонизация»; по мере взросления растений (переход в фазы «цветение», «созревание») происходит накопление сухого вещества и одновременно снижение питательной ценности кормовой массы. В наших исследованиях процентное содержание сырого белка определяли в фазу «начало цветения» обоих укосов. В первую укосную спелость концентрация белка в кормовой массе у ГПФ-49-3 составила 12,8–15,6 %, во втором укосе – 13,2–16,7 %; среднее содержание сырого белка соответствовало стандарту – 14,5 %, поэтому уровень белковой продуктивности определялся сбором сухого вещества и составил в среднем 1,38 т/га, или на 0,10 т/га ($НСР_{05} = 0,08$ т/га) выше стандарта. По годам пользования поступление белка с 1 гектара посевов сортопопуляции ГПФ-49-3 составило в среднем около 2 т в первый и 0,8 т во второй год (рис. 3).

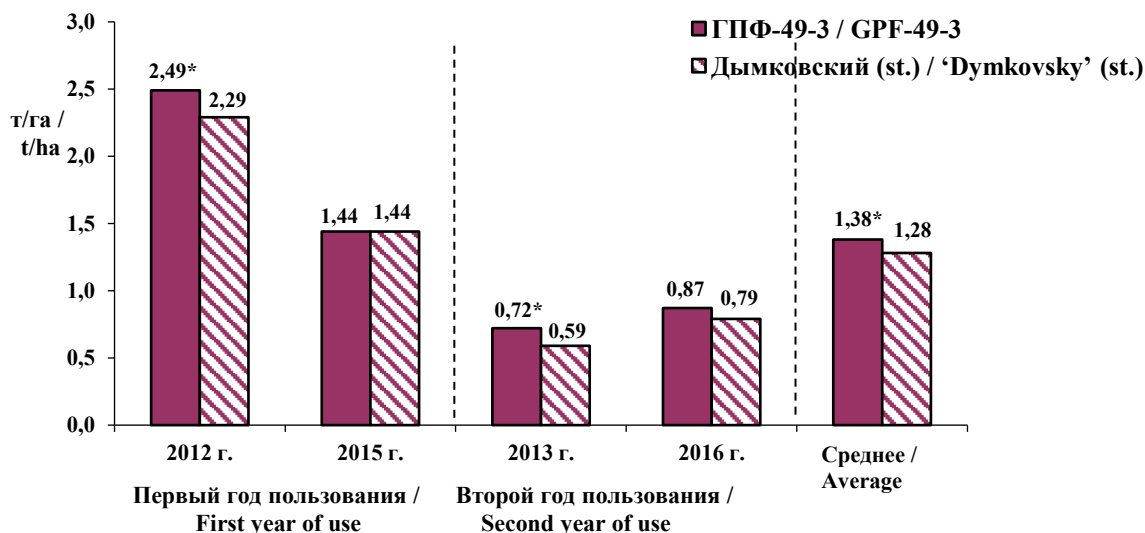


Рис. 3. Сбор сырого белка (т/га) у сортопопуляции клевера лугового ГПФ-49-3 в КСИ (*значение достоверно выше стандарта при $P \geq 0,95$) /

Fig. 3. Collection of crude protein (t/ha) from the cultivar population of GPF-49-3 meadow clover in Competitive cultivar testing (*the value is significantly higher than the standard at $P \geq 0.95$)

Как отмечают исследователи, в настоящее время отсутствуют сорта, характеризующиеся стабильной семенной продуктивностью в условиях Северного региона, где урожайность семян в большей степени, чем кормовая продуктивность, зависит от метеорологических условий периода вегетации [12]. Результаты наших исследований согласуются с данной закономерностью: на севере Волго-Вятского региона вариабельность признака по кормовой продуктивности составляет 38 %, по семенной – 51 %. Однако, если стабильность рассмат-

ривать с точки зрения способности сорта в зоне рискованного земледелия к гарантированному семенному воспроизводству, то новая сортопопуляция ГПФ-49-3 соответствует характеристике «стабильная» по данному признаку. Для раннеспелого клевера сумма положительных температур для созревания должна составлять 1200–1500 °С [4]. За весь период наблюдений было достаточное накопление тепла для формирования и созревания семян у сортопопуляции ГПФ-49-3 (табл. 1), средний уровень урожайности составил 2,98 ц/га и был выше показателя ст. Дымковский на 0,45 ц/га (рис. 4).

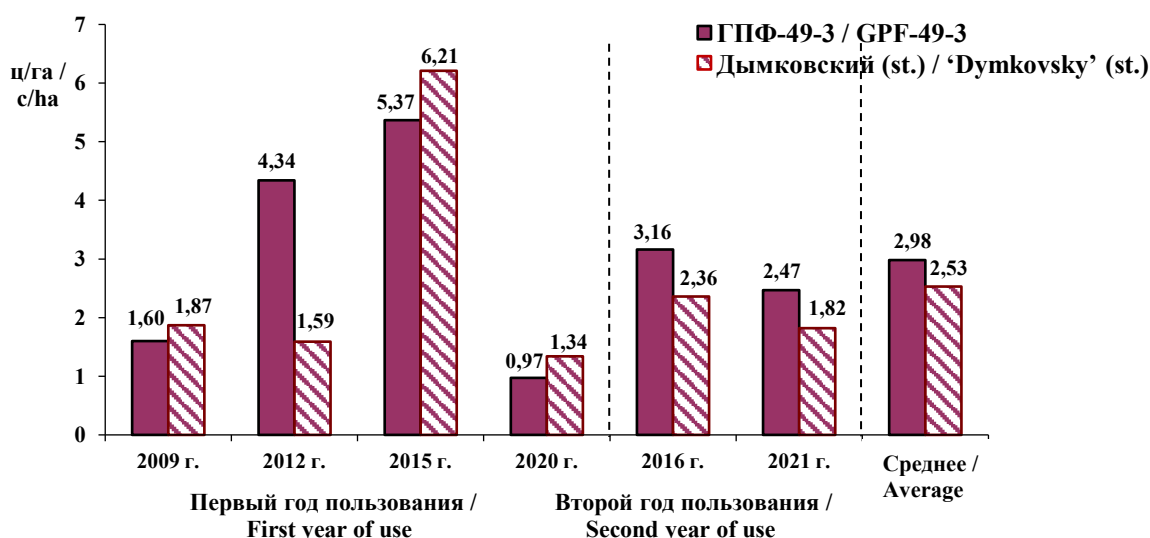


Рис. 4. Урожайность семян у сортопопуляции клевера лугового ГПФ-49-3, ц/га /

Fig. 4. Seed yield for cultivar population of GPF-49-3 meadow clover, c/ha

Максимальная урожайность семян (5,37 ц/га) получена в 2015 г., минимальная (0,97 ц/га) – в 2020 г. и связана с продолжительным похолоданием во время цветения семенного травостоя во второй-третьей декадах июня со среднесуточной температурой воздуха от 9,2 до 15,2 °С. Согласно научным данным, оптимальная температура воздуха, способствующая обильному выделению нектара, для большинства растений колеблется в пределах от 16 до 25 °С, при понижении или повышении температурного режима нектаропродуктивность падает, вследствие чего снижается посещаемость цветков насекомыми-опылителями и соответственно урожайность семян [21].

Одно из важнейших достоинств сортопопуляции ГПФ-49-3 – устойчивость к корневым гнилям (основной патогенный комплекс – грибы рода *Fusarium* Lk.) – наиболее вредонос-

ному заболеванию клевера лугового в Нечернозёмной зоне [22]. У ГПФ-49-3 устойчивость к корневым гнилям генетически обусловлена, поскольку на этапах селекции в лабораторных и полевых условиях были произведены многократные отборы резистентных к искусственной фузариозной инфекции генотипов, из которых была сформирована популяция. За годы изучения поражение внутренних тканей корня, приносящее наибольший вред растениям – происходит закупорка сосудов мицелием гриба, постепенно развивающаяся в сухую гниль, нарушается питание, угнетается рост и развитие, как следствие, снижается продуктивность травостоя [23] – наблюдали в значительно меньшей степени, чем у сорта-стандарта: распространённость заболевания носила умеренный характер, охватывая от 33,3 до 56,0 % растений, у ст. Дымковский достигала 88,9 % (табл. 4).

Таблица 4 – Поражаемость сортопопуляции клевера лугового ГПФ-49-3 корневыми гнилями на полевом естественно-инфекционном фоне (КСИ, 2009–2020 гг.) /

Table 4 – Susceptibility of the GPF-49-3 meadow clover cultivar population to root rot against a field natural infectious background (Competitive cultivar testing, 2009–2020)

Сорт / Cultivar	2009 г.		2012 г.		2015 г.		2020 г.	
	%	± к см. / ± to st.	%	± к см. / ± to st.	%	± к см. / ± to st.	%	± к см. / ± to st.
Распространённость болезни (P) / Prevalence of the disease (P)								
ГПФ-49-3 / GPF-49-3	33,3	-55,6	56,0	+1,0	52,7	-7,3	45,4	-4,3
Дымковский (ст.) / 'Dymkovsky' (st.)	88,9	-	55,0	-	60,0	-	49,7	-
Интенсивность развития болезни (ИРБ) / Intensity of disease development (IDD)								
ГПФ-49-3 / GPF-49-3	6,7	-20,0*	16,0	-1,0	21,2	-9,1*	9,1	-5,9*
Дымковский (ст.) / 'Dymkovsky' (st.)	26,7	-	17,0	-	30,3	-	15,0	-
HCP ₀₅ / LSD ₀₅	10,7		-		8,5		4,5	

*Отклонение от стандарта достоверно при $P \geq 0,95$ / *Deviation from the standard is significant at $P \geq 0,95$

Интенсивность поражения тканей варьировала от очень слабой (6,7; 9,1 % в 2009, 2020 гг.) до слабой (16,0; 21,2 % в 2012, 2015 гг.), что на 1–20 % меньше, чем у ст. Дымковский (15,0–30,3 %), и характеризует новую сортопопуляцию как устойчивую к корневым гнилям при возделывании на обычном полевом фоне в условиях естественного развития инфекции.

В наших исследованиях показатели кормовой продуктивности (урожайность зелёной массы, сбор сухого вещества, сырого белка) травостоев 2 г. п. у сортопопуляции ГПФ-49-3

стабильно превышали уровень ст. Дымковский во все годы изучения. Можно предположить, что данная закономерность частично обусловлена большей устойчивостью растений к корневым гнилям перед второй перезимовкой: более здоровый травостой меньше подвержен влиянию неблагоприятных факторов в период покоя и обладает лучшей силой роста после выхода из-под снега. Рассчитанные коэффициенты корреляции между интенсивностью развития болезни в 1 г. п. и показателями продуктивности растений во 2 г. п.: зелёной массой

(-0,43), сухим веществом (-0,50), сбором белка (-0,58), свидетельствующие о средней степени сопряжённости признаков, вполне обосновывают наши предположения.

Экологическое испытание новой сортопопуляции проводили на полях Фалёнской селекционной станции (п. Фалёнки, юго-восток Центральной агроклиматической зоны Кировской области), территория которой отличается

более контрастными условиями вегетации по отношению к г. Киров. В цикле испытаний (2018, 2019 гг.) сортопопуляция ГПФ-49-3 достигала фазы укосной спелости на 7 дней раньше ст. Дымковский и характеризовалась высокими показателями зимостойкости (98,6 %), продуктивности зелёной (52,3 т/га) и сухой массы (19,5 т/га), сбора сырого белка (2,49 т/га), устойчивости к корневым гнилям (табл. 5).

Таблица 5 – Хозяйственно-биологическая характеристика сортопопуляции клевера лугового ГПФ-49-3 в ЭСИ (среднее за 2018–2019 гг.) /

Table 5 – Economic and biological characteristics of the GPF-49-3 meadow clover cultivar population in Environmental cultivar testing (average for 2018–2019)

Показатель / Indicator	ГПФ-49-3 / GPF-49-3	Дымковский (ст.) / 'Dymkovsky' (st.)	Отклонения от ст. (±) / Deviations from the st. (±)	HCP ₀₅ / LSD ₀₅
Зимостойкость, % / Winter hardiness, %	98,6	97,9	+0,7	-
Вегетационный период до первого укоса, дни / Growing season before the first cutting, days	63	70	-7	-
Высота растений, см / Plant height, cm:				
1-й укос / first cutting	93,6	105,4	-11,8	-
2-й укос / second cutting	48,4	35,5	+12,9	-
Облиственность, % / Leafiness, %:				
1-й укос / first cutting	50,8	47,0	+3,7	-
2-й укос / second cutting	78,2	91,6	-13,4	-
Урожайность зелёной массы, т/га / Green mass yield, t/ha	52,3*	46,6	+5,7	4,8
Сбор сухого вещества, т/га / Dry matter yield, t/ha	19,5	18,7	+0,8	1,6
Содержание сырого белка, % / Crude protein content, %	12,8	12,3	+0,5	-
Сбор сырого белка, т/га / Crude protein yield, t/ha	2,49	2,30	+0,19	0,25
Корневая гниль (ИРБ, %) / Root rot (IRB, %):				
наружная / external	37,3	66,7	-29,4	-
внутренняя / internal	22,7	49,3	-26,6	-

*Значение достоверно выше стандарта ($P \geq 0,95$) / *Value is significantly higher than the standard ($P \geq 0,95$)

Заключение. В результате длительной селекционной работы (1983–2021 гг.) в ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока создана новая перспективная сортопопуляция клевера лугового ран-незрелого ГПФ-49-3, которая показала преимущество перед стандартным сортом Дымковский по ряду продуктивных и адаптивных качеств. В условиях Кировской области сортопопуляция ГПФ-49-3 характеризуется высокой зимостойкостью (78–100 %), толерантностью к засухе, ранними сроками укосной и уборочной спелости, высокими показателями кормовой продуктив-

ности: урожайностью зелёной массы 49,1–52,3 т/га (max = 88,3 т/га), сбором сухого вещества 11,3–19,5 т/га (max = 20,5 т/га), сырого белка 1,38–2,49 т/га, семян 2,98 ц/га (max = 5,37 ц/га), устойчивостью к корневым гнилям при возделывании на обычном полевом естественно-инфекционном фоне. В 2021 г. сортопопуляция ГПФ-49-3 передана на государственное сортоиспытание как новый сорт клевера лугового Малахит, перспективный для районирования в северных регионах европейского Нечерноземья России.

Список литературы

1. Кутузова А. А., Шпаков А. С., Косолапов В. М., Тебердиев Д. М., Воловик В. Т. Состояние и перспективы развития кормопроизводства в Нечернозёмной зоне РФ. Кормопроизводство. 2021;(2):3–8.
2. Тюрин И. Ю., Левченко Г. В., Комаров Ю. В., Шарашов М. Д., Гамаюнов Д. В. Состояние кормопроизводства и его роль в развитии животноводства. Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. 2023;(1):130–137. DOI: <https://doi.org/10.24412/2311-6447-2023-1-130-137> EDN: THOOGA
3. Синицына С. М., Спиридонов А. М., Данилова Т. А. Перспективы развития кормопроизводства на Северо-Западе России. Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2018;3(52):189–197. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36394689> EDN: YNDQJV
4. Мухина Н. А., Шестиперова З. И. Клевер. Л.: Колос, 1978. 168 с.
5. Новоселов М. Ю. Селекция клевера лугового (*Trifolium pratense* L.). М.: ВНИИК, 1999. 183 с.
6. Павлючик Е. Н., Капсамун А. Д., Иванова Н. Н., Тюлин В. А., Силина О. С. Роль многолетних трав в создании устойчивой кормовой базы при конвейерном использовании. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2019;20(3):238–246. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2019.20.238-246> EDN: TCMORZ
7. Евстратова Л. П., Николаева Е. В., Евсеева Г. В. Эффективность использования многолетних трав в решении проблемы биологизации земледелия Республики Карелия. Биосфера. 2022;14(3):156–162. DOI: <https://doi.org/10.24855/biosfera.v14i3.687> EDN: VYWUPX
8. Фигурин В. А., Кислицына А. П., Сунцова Н. П. Средоулучшающая роль многолетних трав в северном земледелии. Агротехнологические и экологические аспекты развития растениеводства на Евро-Северо-Востоке Российской Федерации: мат-лы научной сессии и школы молодых ученых по эколого-генетическим основам северного растениеводства 15–16 июля 2008 г. Киров, 2008. С. 83–88.
9. Nitu I. Importance of red clover culture in the context of sustainable agriculture system. The Annals of “Valahia” University of Targoviste. 2017;11(2):6–9. URL: https://www.researchgate.net/publication/320845733_Importance_of_Red_Clover_Culture_in_the_Context_of_Sustainable_Agriculture_System
10. Atienza S. G., Rubiales D. Legumes in sustainable agriculture. Crop & Pasture Science. 2017;68(11):i–ii. DOI: https://doi.org/10.1071/CPv68n11_FO
11. McKenna P., Cannon N., Conway J., Dooley J. The use of red clover (*Trifolium pratense*) in soil fertility-building: A Review. Field Crops Research. 2018;221:38–49. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.02.006>
12. Корелина В. А., Батакова О. Б., Зобнина И. В. Оценка перспективных селекционных образцов клевера лугового в конкурсном сортоиспытании по основным хозяйственно полезным признакам. Таврический вестник аграрной науки. 2021;4(28):101–108. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47298890> EDN: JOOSBD
13. Мазин А. М. Приёмы восстановления высокоурожайного сорта клевера лугового (*Trifolium pratense* L.) селекции Псковского НИИСХ. АгроЭкоИнженерия. 2020;(1(102)):82–91. DOI: <https://doi.org/10.24411/0131-5226-2020-10231> EDN: ASFSRA
14. Косолапов В. М., Костенко С. И., Пилипко С. В. Направления и задачи селекции кормовых трав в России. Достижения науки и техники АПК. 2018;32(2):21–24. DOI: <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2018-10205> EDN: YVJGZM
15. Марецкий Ю. А., Марецкая В. Н. Анализ факторов формирования и развития аграрного потенциала сельскохозяйственного производства в условиях Севера. Стратегия устойчивого развития регионов России. 2010;(3):275–280. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21046576> EDN: RSOPWX
16. Онучина О. Л., Грипась М. Н., Корнева И. А. Раннеспелые сорта клевера лугового селекции ФАНЦ Северо-Востока и их использование в сельскохозяйственном производстве Кировской области. The scientific heritage. 2020;(56-3(56)):9–12. DOI: <https://doi.org/10.24412/9215-0365-2020-56-3-9-12> EDN: FMXYJY
17. Корелина В. А., Батакова О. Б., Зобнина И. В. Изучение и оценка исходного материала клевера лугового. Таврический вестник аграрной науки. 2023;(3(35)):110–119. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.10141264> EDN: NGEWCB
18. Грипась М. Н., Арзамасова Е. Г., Попова Е. В., Онучина О. Л. История селекции многолетних трав в Вятском крае. Методы и технологии в селекции растений и растениеводстве: мат-лы VI Междунар. науч.-практ. конф. (к 125-летию ФАНЦ Северо-Востока им. Н. В. Рудницкого) 01–03 июля 2020 г. Киров: ФАНЦ Северо-Востока, 2020. С. 62–69. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44125108> EDN: DLTDLN
19. Грипась М. Н., Арзамасова Е. Г., Попова Е. В. Комплексная оценка перспективных сортов клевера лугового. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2018;66(5):51–58. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2018.66.5.51-58> EDN: VNJCUO
20. Онучина О. Л., Корнева И. А. Перспективные раннеспелые сорта клевера лугового для условий Северо-Востока европейской части России. Sciences of Europe. 2017;(21-3(21)):3–7. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30778367> EDN: ZXNPHL

21. Тарасов Е. Я. Эффективное пчеловодство. Ростов-на-Дону: Владис, 2007. 267 с.
22. Пуца Н. М., Разгуляева Н. В., Костенко Н. Ю., Благовещенская Е. Ю. О поражаемости кормовых трав основными грибными болезнями. Кормопроизводство. 2012;9:24–25.
23. Миняева О. М. Корневая гниль клевера и пути борьбы с ней: Аналитический обзор. М., 1972. 102 с.

References

1. Kutuzova A. A., Shpakov A. S., Kosolapov V. M., Teberdiev D. M., Volovik V. T. Current state and potential of forage production in the Non-chernozem region. *Kormoproizvodstvo* = Forage Production. 2021;(2):3–8. (In Russ.).
2. Tyurin I. Yu., Levchenko G. V., Komarov Yu. V., Sharashov M. D., Gamayunov D. V. The state of feed production and its role in the development of animal husbandry. *Tekhnologii pishchevoy i pererabatyvayushchey promyshlennosti APK – produkty zdorovogo pitaniya* = Technologies for the Food and Processing Industry of AIC – Healthy Food. 2023;(1):130–137. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24412/2311-6447-2023-1-130-137>
3. Sinitsyna S. M., Spiridonov A. M., Danilova T. A. Prospects for the development of feed production in the North-West of Russia. *Izvestiya Sankt-Petersburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Izvestiya Saint-Petersburg State Agrarian University. 2018;3(52):189–197. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36394689>
4. Mukhina N. A., Shestiperova Z. I. Clover. Leningrad: Kolos, 1978. 168 p.
5. Novoselov M. Yu. Breeding of meadow clover (*Trifolium pratense* L.). Moscow: VNIK, 1999. 183 p.
6. Pavlyuchik E. N., Kapsamun A. D., Ivanova N. N., Tyulin V. A., Silina O. S. The role of perennial grasses in creating a sustainable feed base by conveyor use. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2019;20(3):238–246. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2019.20.238-246>
7. Evstratova L. P., Nikolaeva E. V., Evseeva G. V. The effectiveness of the use of perennial grasses in solving the problem of biologization of agriculture in the Republic of Karelia. *Biosfera*. 2022;14(3):156–162. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24855/biosfera.v14i3.687>
8. Figurin V. A., Kislitsyna A. P., Suntsova N. P. The environment-improving role of perennial grasses in northern agriculture. Agrotechnological and ecological aspects of crop production development in the Euro-Northeast of the Russian Federation: Proceedings of the scientific session and the school of young scientists on the ecological and genetic foundations of northern crop production on July 15–16, 2008. Kirov, 2008. pp. 83–88.
9. Nitu I. Importance of red clover culture in the context of sustainable agriculture system. The Annals of “Valahia” University of Targoviste. 2017;11(2):6–9. URL: https://www.researchgate.net/publication/320845733_Importance_of_Red_Clover_Culture_in_the_Context_of_Sustainable_Agriculture_System
10. Atienza S. G., Rubiales D. Legumes in sustainable agriculture. *Crop & Pasture Science*. 2017;68(11):i–ii. DOI: https://doi.org/10.1071/CPv68n11_FO
11. McKenna P., Cannon N., Conway J., Dooley J. The use of red clover (*Trifolium pratense*) in soil fertility-building: A Review. *Field Crops Research*. 2018;221:38–49. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.02.006>
12. Korelina V. A., Batakova O. B., Zobnina I. V. Evaluation of promising breeding samples of meadow clover in competitive variety testing according to the main economically useful characteristics. *Tavricheskiy vestnik agrarnoy nauki* = Taurida herald of the agrarian sciences. 2021;4(28):101–108. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47298890>
13. Mazin A. M. Methods to reintroduce the high-yielding varieties of meadow clover (*Trifolium pratense* L.) bred in Pskov research institute of agriculture. *AgroEkoInzheneriya* = Agricultural Engineering (Moscow). 2020;(1(102)):82–91. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24411/0131-5226-2020-10231>
14. Kosolapov V. M., Kostenko S. I., Pilipko S. V. Directions and tasks of breeding of forage grasses in Russia. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK* = Achievements of Science and Technology of AICis. 2018;32(2):21–24. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2018-10205>
15. Maretskiy Yu. A., Maretskaya V. N. Analysis of the factors of formation and development of the agricultural potential of agricultural production in the conditions of the North. *Strategiya ustoychivogo razvitiya regionov Rossii*. 2010;(3):275–280. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21046576>
16. Onuchina O. L., Gripas' M. N., Korneva I. A. Early varieties red clover breeding FARC of the North-East and their use in the agricultural production of the Kirov region. The scientific heritage. 2020;(56-3(56)):9–12. (In Hungary). DOI: <https://doi.org/10.24412/9215-0365-2020-56-3-9-12>
17. Korelina V. A., Batakova O. B., Zobnina I. V. Study and evaluation of the source material of meadow clover. *Tavricheskiy vestnik agrarnoy nauki* = Taurida herald of the agrarian sciences. 2023;(3(35)):110–119. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.10141264>
18. Gripas' M. N., Arzamasova E. G., Popova E. V., Onuchina O. L. The history of breeding perennial herbs in the Vyatka region. Methods and technologies in plant breeding and crop production: Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference (to the 125th anniversary of FARC North-East) 01–03 July, 2020. Kirov: FARC North-East, 2020. pp. 62–69. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44125108>

19. Gripas' M. N., Arzamasova E. G., Popova E. V. Complex estimation of red clover perspective varieties. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2018;66(5):51-58. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2018.66.5.51-58>
20. Onuchina O. L., Korneva I. A. Perspective early varieties of red clover for conditions of north-east of European of Russia. *Sciences of Europe*. 2017;(21-3(21)):3–7. (In the Czech Republic). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30778367>
21. Tarasov E. Ya. Effective beekeeping. Rostov-na-Donu: *Vladis*, 2007. 267 p.
22. Putsa N. M., Razgulyaeva N. V., Kostenko N. Yu., Blagoveshchenskaya E. Yu. On the susceptibility of forage grass to the main fungal diseases. *Kormoproizvodstvo* = Forage Production. 2012;9:24–25. (In Russ.).
23. Minyaeva O. M. Clover root rot and ways to combat it: An analytical review. Moscow, 1972. 102 p.

Сведения об авторах

✉ **Арзамасова Екатерина Геннадьевна**, кандидат с.-х. наук, старший научный сотрудник, зав. лабораторией селекции и первичного семеноводства многолетних трав, ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого», ул. Ленина, д. 166а, г. Киров, Российская Федерация, 610007, e-mail: priemnaya@fanc-sv.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0939-4400>, e-mail: travy@fanc-sv.ru

Попова Евгения Валериевна, кандидат с.-х. наук, научный сотрудник лаборатории селекции и первичного семеноводства многолетних трав, ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого», ул. Ленина, д. 166а, г. Киров, Российская Федерация, 610007, e-mail: priemnaya@fanc-sv.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7354-4656>

Онучина Ольга Леонидовна, кандидат с.-х. наук, старший научный сотрудник, зав. лабораторией селекции и первичного семеноводства клевера, 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-direktor@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4182-8106>

Шихова Ирина Витальевна, младший научный сотрудник лаборатории молекулярной биологии и селекции, ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого», ул. Ленина, д. 166а, г. Киров, Российская Федерация, 610007, e-mail: priemnaya@fanc-sv.ru

Information about the authors

✉ **Ekaterina G. Arzamasova**, PhD in Agricultural Science, senior researcher, Head of the Laboratory of breeding and primary seed growing of perennial grasses, Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky, Lenin str., 166a, Kirov, Russian Federation, 610007, e-mail: priemnaya@fanc-sv.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0939-4400>, e-mail: travy@fanc-sv.ru

Eugenia V. Popova, PhD in Agricultural Science, researcher, the Laboratory of breeding and primary seed growing of perennial grasses, Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky, Lenin str., 166a, Kirov, Russian Federation, 610007, e-mail: priemnaya@fanc-sv.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7354-4656>

Olga L. Onuchina, PhD in Agricultural Science, senior researcher, the Laboratory of breeding and primary seed growing of clover, 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-direktor@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4182-8106>

Irina V. Shihova, junior researcher, the Laboratory of molecular biology and breeding, Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky, Lenin str., 166a, Kirov, Russian Federation, 610007, e-mail: priemnaya@fanc-sv.ru

✉ – Для контактов / Corresponding author

Изучение экспрессии генов целлюлозосинтаз у льна в процессе роста

© 2024. Т. А. Базанов✉, И. В. Ушаповский, Н. Н. Логинова, Е. В. Минина,
П. Д. Вересова

ФГБНУ «Федеральный научный центр лубяных культур», г. Тверь,
Российская Федерация

В селекции лубяных культур, направленной на создание высоковолокнистых сортов, важным является выявление закономерностей формирования волокна на молекулярном уровне, определение генотипспецифичности процессов синтеза целлюлозы, изучение эффективности работы генов, отвечающих за синтез целлюлозы на различных этапах онтогенеза растений. Целью работы являлось изучение экспрессии генов целлюлозосинтаз льна. Объектом исследования являлись 8 образцов льна (род *Linum*), отличающихся по содержанию волокна: 7 сортов *Linum usitatissimum* L., из которых 5 сортов льна-долгунца, 2 сорта льна масличного, один образец льна крупноцветкового (*L. grandiflorum* Desf.). Исследуемые сорта выращивали в растительной установке. Пробы растительного материала отбирали на 10-й, 20-й, 30-й, 40-й и 50-й дни после появления всходов. Проводили извлечение РНК, синтез кДНК. Были получены последовательности РНК *CesA1*, *CesA4*, *CesA6*, *CesA7* и разработаны ген-специфические праймеры для ПЦР. Экспрессию генов определяли методом полуколичественной RT-PCR, продукты реакции разделяли по размеру с помощью 1,2%-го агарозного геля. На основании полученных данных было установлено наличие фазо- и генотипспецифичности в процессе экспрессии целлюлозосинтаз семейства *CesA* в стебле льна. Целлюлозосинтазы первичной клеточной стенки льна (*CesA1*, *CesA6*) проявляют динамику роста экспрессии до стадии «елочка», а затем экспрессия постепенно снижается к фазе наступления быстрого роста, тогда как целлюлозосинтазы вторичной клеточной стенки (*CesA4*, *CesA7*) характеризуются постоянным увеличением экспрессии от первых дней развития проростков до фазы быстрого роста.

Ключевые слова: лён-долгунец, лен масличный, лен крупноцветковый, первичная клеточная стенка, вторичная клеточная стенка, *CesA*, РНК, кДНК, ПЦР, гель-электрофорез

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания ФГБНУ «Федеральный научный центр лубяных культур» (тема № FGSS-2024-0002).

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Базанов Т. А., Ушаповский И. В., Логинова Н. Н., Минина Е. В., Вересова П. Д. Изучение экспрессии генов целлюлозосинтаз у льна в процессе роста. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2024;25(3):368–378. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.3.368-378>

Поступила: 18.03.2024

Принята к публикации: 14.05.2024

Опубликована онлайн: 26.06.2024

Study of the expression of cellulose synthase genes during plant growth of flax

© 2024. Taras A. Bazanov✉, Igor V. Ushapovsky, Natalya N. Loginova,
Ekaterina V. Minina, Polina D. Veresova

Federal Research Center for Bast Fiber Crops, Tver, Russian Federation

During the selection of crops aimed at creating high-fiber varieties, it is important to determine the patterns of fiber formation at the molecular level and the genotype specificity of cellulose synthesis processes, to study the efficiency of the genes responsible for cellulose synthesis at various stages of plant ontogenesis. The aim of the work was to study the expression of flax cellulose synthase genes. The objects of the study were 8 samples of flax (genus *Linum*), differing in fiber content: 7 cultivars of *Linum usitatissimum* L., of which 5 cultivars of fiber flax, 2 cultivars of oilseed flax, as well as one sample of large-flowered flax (*L. grandiflorum* Desf.). The studied cultivar were grown in a growth chamber. Samples of plant material were taken on the 10th, 20th, 30th, 40th and 50th day after germination. RNA extraction and cDNA synthesis were carried out. RNA sequences of *CesA1*, *CesA4*, *CesA6*, *CesA7* were obtained and gene-specific primers for PCR were developed. Gene expression was determined by semi-quantitative RT-PCR, and reaction products were separated by size using a 1.2% agarose gel. Based on the data obtained, the presence of phase- and genotype-specificity in the process of expression of cellulose synthases of the *CesA* family in the flax stem was established. Cellulose synthases of the primary cell wall of flax (*CesA1*, *CesA6*) show a dynamic increase in expression up to the «herringbone» stage, and then the expression gradually decreases towards the onset of rapid growth phase, while cellulose synthases of the secondary cell wall (*CesA4*, *CesA7*) are characterized by a constant increase in expression from the first days of the development of seedlings to the phase of rapid growth.

Keywords: flax, linseed, large-flowered flax, primary cell wall, secondary cell wall, *CesA*, RNA, cDNA, PCR, gel electrophoresis

Acknowledgments: the research was carried out under the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of the Federal Research Center for Bast Fiber Crops (theme No. FGSS-2024-0002). The authors thank the reviewers for their contribution to the expert evaluation of this work.

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

For citation: Bazanov T. A., Uschapovsky I. V., Loginova N. N., Minina E. V., Veresova P. D. Study of the expression of cellulose synthase genes during plant growth of flax. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = *Agricultural Science Euro-North-East*. 2024;25(3):368–378. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.3.368-378>

Received: 18.03.2024

Accepted for publication: 14.05.2024

Published online: 26.06.2024

На протяжении тысячелетий человечество эффективно использовало лубяные культуры для различных целей. В настоящее время их используют как сырье для текстильной промышленности, в производстве косметики, экологически чистых строительных материалов, в медицине, автомобилестроении и т. д. Интерес к натуральным волокнам также растет из-за экологических проблем и стимулирования развития рынка биоразлагаемых и перерабатываемых материалов, развития биоэнергетики [1, 2, 3].

Производители лубяных культур стремятся добиться высокого выхода и качества волокна. Основными хозяйственно ценными параметрами являются содержание волокна в стебле, прочность, линейная плотность, гибкость, цвет. Качество волокна рассматривается как интегральная характеристика, зависящая как от особенностей сорта и агроприемов, влияющих на формирование волокон растения, а также от способа обработки стеблей после сбора урожая. Важность биологической основы качества волокна отражается в выраженных различиях технических параметров волокна между сортами сельскохозяйственных культур [4]. Существуют многочисленные исследования, описывающие анатомические, морфологические и биохимические различия между сортами, связанные с качеством волокна. Для селекционной работы, направленной на высокие показатели продуктивности и качества волокна создаваемых сортов, необходимо изучать особенности генетического контроля формирования волокна, разрабатывать методологию управления синтезом целлюлозы и других биохимических компонентов волокна.

Культурный лен (*Linum usitatissimum* L.) использовался для производства растительного волокна на протяжении многих тысяч лет [5]. Лубяные волокна льна – это первичные волокна, происходящие из прокамбия и сходные с рядом первичных лубяных волокон других видов растений (конопли, крапивы), образующие

толстую, богатую целлюлозой клеточную стенку [6]. Прежде чем инициируется утолщение клеточной стенки, волокна подвергаются специфическому типу клеточного удлинения, называемому интрузивным ростом, который происходит в глубине других тканей ствола [7]. Этот этап развития оказывает заметное влияние на выход и качество волокна, который во многом недооценен и недостаточно хорошо описан с молекулярно-генетической точки зрения [8, 9]. Структура и состав лубяного волокна аналогичны клеточной стенке G-волокон (желатинозных волокон) древесины [6, 10] и существенно отличаются от других типов клеточных стенок. Характерной отличительной особенностью лубяных волокон является высокое содержание целлюлозы (до 90 %). Целлюлозные микрофибриллы лубяного волокна аксиально ориентированы и переплетены матричными полимерами [6]. Как химический состав, так и пространственная организация полимеров в структуре клеточной стенки способствуют естественной прочности, гибкости, гладкости и линейности льняных волокон.

Волокна льна рассматриваются как одно из проявлений эволюционной специализации клеток, метаболизм которых ориентирован на масштабный синтез одного из метаболитов – целлюлозы. Целлюлоза, как совокупность неразветвленных полимеров β -1,4-связанных остатков глюкозы, является основным компонентом лубяных волокон и синтезируется растениями, большинством водорослей, некоторыми бактериями и грибами, и даже некоторыми животными [11]. Гены, синтезирующие целлюлозу у высших растений, отличаются от генов, обнаруженных у *Acetobacter* и *Agrobacterium* sp. Белки растительной целлюлозосинтазы (CesA) или каталитические субъединицы целлюлозосинтазы представляют собой интегральные мембранные белки длиной, примерно, 1000 аминокислот. Изучены последовательности для более 20 полноразмерных генов CesA, и они демонстрируют высокое

сходство друг с другом по всей длине кодируемого белка, за исключением двух небольших областей вариабельности. Существует ряд высококонсервативных остатков, включая несколько мотивов, которые, как показано, необходимы для активности гликозилтрансферазы. Кристаллическая структура белков целлюлозосинтазы и точный ферментативный механизм еще не изучены.

Гены *CesA* высших растений принадлежат к мультигенному семейству [12]. Установлено, что в образовании целлюлозосинтезирующего комплекса (так называемой «розетки») участвуют несколько различных *CesA* белков и как минимум три *CesA* гена транскрибируются одновременно; это свидетельствует о том, что три различных белка целлюлозосинтазы формируют функциональный целлюлозосинтезирующий комплекс [13, 14, 15]. В биосинтезе первичной и вторичной клеточной стенки участвуют продукты определенных *CesA* генов растений: для первичной клеточной стенки (далее ПКС) – *CesA1*, *CesA6*; для вторичной клеточной стенки (далее ВКС) – *CesA4*, *CesA7* [12].

Анализ экспрессии генов в критические периоды развития льна может повысить точность идентификации задействованных ключевых генов по сравнению с функциональным геномным подходом. Развивающиеся лубяные волокна характеризуются высокой экспрессией генов целлюлозосинтаз, белков арабиногалактана, β -галактозидаз и хитиназоподобных белков, которые связаны со структурой клеточной стенки и особенностями кристаллической структуры целлюлозы и являются важными мишенями для дальнейшего улучшения качества лубяных волокон [16]. Также установлено, что множественные факторы транскрипции активируются во время развития лубяных волокон, что потенциально идентифицирует ряд ключевых регуляторов развития волокон [17]. Результаты проводимых в этой области исследований позволяют формировать новые перспективные селекционно-генетические подходы в создании высоковолокнистых сортов льна и расширяют теоретические основы изучения биологии лубяных культур.

Цель исследования – изучение экспрессии генов целлюлозосинтаз льна в процессе роста растений.

Научная новизна – изучение паттерна экспрессии генов целлюлозосинтаз у образцов

культурного льна разных направлений селекции, а также *L. grandiflorum* Desf. с различным содержанием волокна.

Материал и методы. Экспериментальные исследования выполнены в лаборатории молекулярно-генетических исследований и клеточной селекции ФГБНУ «Федеральный научный центр лубяных культур».

В качестве объекта исследований по экспрессии целлюлозосинтаз льна было использовано 7 сортов *Linum usitatissimum* L., из них 5 сортов льна-долгунца и 2 сорта льна масличного, включенных в Государственный реестр селекционных достижений Российской Федерации, и один образец льна крупноцветкового (*L. grandiflorum* Desf.). Критерием выбора сортов образцов было значение параметра «содержание волокна», т. е. высоко- и низковолокнистые образцы. Перечень исследованных сортов льна представлен в таблице 1.

Изучаемые генотипы выращивали в растительной установке при температуре 22 °С и фотопериоде «день/ночь» – 16/8 часов. Образцы отбирали на 10-й, 20-й, 30-й, 40-й и 50-й дни после всходов растений, немедленно замораживали в жидком азоте, где их хранили до выделения РНК. У 10-дневных растений удаляли семядоли, верхние листья, корни и выделяли РНК из гипокотилей. У более взрослых растений использовали части стебля длиной 4 см, взятые на 2 см ниже «точки слома». У образцов также удаляли листья и экстрагировали РНК из участков стебля. «Точка слома» (snap point) является местом перехода волокон от удлинения к утолщению клеточной стенки, которое можно обнаружить вручную по увеличению усилия, необходимого для слома стебля [19].

Извлечение РНК из растительного материала проводили с помощью набора реагентов для колоночного выделения тотальной РНК из растений RNA-Xtrac Plants (ООО «Биомедицинские инновации», Россия) в соответствии с инструкцией производителя. Контроль качества экстрагированной РНК осуществляли путем электрофореза образцов РНК в 1,5%-ном агарозном геле и спектрофотометрических измерений. Перед обратной транскрипцией образцы РНК обрабатывали ДНКазой. Синтез кДНК осуществляли с помощью набора «Обратная транскриптаза M-MuLV без активности РНКазы H (RNH-)» («Биолабмикс», Россия) в соответствии с инструкцией производителя.

Таблица 1 – Перечень сортообразцов льна, использованных для исследования экспрессии генов целлюлозосинтаз /

Table 1 – List of flax cultivar used to study the expression of cellulose synthase genes

Генотип / Genotype	Оригинатор / Originator	Содержание волокна, % / Fiber content, %	Источник данных / Data source
Лен-долгунец / Fiber flax			
Томский 16 / ‘Tomskii 16’	Сибирский федеральный научный центр агробиотех- нологий РАН (СФНЦА РАН), г. Новосибирск / Sibe- rian Federal Research Center of Agrobiotechno-logies RAS, Novosibirsk	35	[18]
Лен-долгунец / Fiber flax			
Визит / ‘Vizit’	Федеральный научный центр лубяных культур, обособленное подразделение НИИ льна (ОП НИИЛ), г. Торжок / Federal Research Center for Bast Fiber Crops, separate division of the Flax Research Institute, Torzhok	32	Государственный реестр селекци- онных достижений РФ ¹ / State Register of Selection Achieve-ments of the Russian Federation
Надежда / ‘Nadezhda’		29	
Универсал / ‘Universal’		25,8	
Синичка / ‘Sinichka’	Вятский государственный агротехнологический уни- верситет (Вятский ГАТУ), г. Киров / Vyatka State Agrotechnological University, Kirov	18,8–20,5	
Лен масличный / Oilseed flax			
ЛМ 98 / LM 98	Федеральный научный центр лубяных культур, обособленное подразделение НИИ льна (ОП НИИЛ), г. Торжок / Federal Research Center for Bast Fiber Crops, separate division of the Flax Research Institute, Torzhok	20–25	Электронный ресурс ² / Electronic resource
РФН / RFN	Федеральный научный центр Всероссийский научно- исследовательский институт масличных культур имени В. С. Пустовойта (ФНЦ ВНИИМК), г. Краснодар / Federal Research Center of V. S. Pustovoit All-Russian Research Institute of Oil Crops, Krasnodar		
Лен крупноцветковый / Large-flowered flax			
<i>L. grandiflorum</i> Desf. к-3284	Коллекция Федерального научного центра лубяных культур (ФНЦ ЛК), г. Тверь / Collection of the Federal Research Center for Bast Fiber Crops, Tver	< 20	Данные авторов / Authors’ data

Для получения последовательностей РНК Cesa1, Cesa4, Cesa6, Cesa7 использовали интерфейс UniProt³. С полученными последовательностями был проведен BLAST-анализ на геном *Linum usitatissimum* L. с помощью программного обеспечения NCBI⁴. Ген-специфические праймеры для ПЦР (табл. 2) были разработаны с использованием программного обеспечения Primer3plus⁵.

RT-PCR обеспечивает высокочувствительный и специфичный метод анализа экспрессии мультигенных семейств, позволяющий определять слабоэкспрессированные транскрипты и, таким образом, изучать экспрессию на разных стадиях роста. В данной работе был использован метод полуколичественной (SQ)-RT-PCR, предназначенный для сравнения уровней экспрессии генов в мультигенных семействах.

¹Государственный реестр селекционных достижений, рекомендованных к использованию в Российской Федерации. [Электронный ресурс]. URL: <https://gossortrf.ru> (дата обращения: 13.11.2023).

²Лен масличный – текстильное сырьё. РосЛенКонопля: сайт о льне и конопле. 2019. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.rosflaxhemp.ru/fakti-i-cifri/o-lne/pererabotka.html/id/3059> (дата обращения: 13.11.2023).

³UniProt consortium. 2003. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.uniprot.org/> (дата обращения: 11.09.2023).

⁴The National Center for Biotechnology Information. 1988. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/> (дата обращения: 09.09.2023).

⁵Primer3Plus: pick primers from a DNA sequence. 2012. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.primer3plus.com/> (дата обращения: 09.09.2023).

Таблица 2 – Последовательности праймеров, использованных для полуколичественной RT-PCR /
Table 2 – Sequences of primers used for semi-quantitative RT-PCR

Ген / Gene	Последовательность праймера, 5'→3' / Sequence primer 5'→3'	
	прямой / forward	обратный / reverse
CesA1	CTTGCTGTGGATTACCCGGT	AGCTCGCCTCTCTTTCACAA
CesA4	TGGAAAGAACCGTGTTTGCTG	TGGGGAATCTCTGTGGTGTG
CesA6	TGACTCTATTGTGGGTTTCGAGT	ACACTACACATCCGGTCAGC
CesA7	AAGATGCTTGGCCCTATCGT	GACGAGTGTGGCTTTCCTGT

Полуколичественная RT-PCR основана на относительной экспрессии, измеренной во время линейной фазы реакции [20]. При полуколичественной RT-PCR целевой вид кДНК амплифицируется с использованием одинакового количества циклов для всех исследуемых образцов. После электрофоретического разделения в геле и окрашивания EtBr (или каким-либо другим красителем нуклеиновой кислоты) скорость экспрессии целевого гена оценивают путем измерения интенсивности полосы, соответствующей образовавшемуся ампликону. Интенсивность полосы отражает количество копий целевой кДНК (т. е. целевой мРНК) в начале ПЦР и, следовательно, уровень экспрессии целевого гена в образце.

Полуколичественную RT-PCR проводили с использованием количественных образцов кДНК из 10–50-дневных растений с использованием 28 циклов, как было рекомендовано в работах [21, 22]. Амплификацию RT-PCR проводили в термоциклере T-100 (BioRad). Оптимизированная смесь для реакции амплификации (25 мкл) содержала 4 нг кДНК, 1х ПЦР-буфер, 1,5 mM MgCl₂, 0,8 mM dNTP, 0,4 мкМ каждого праймера и 1,5 ед. ДНК-полимеразы Taq. На первом этапе амплификации происходила начальная денатурация при 95 °C в течение 15 мин; затем следовали 28 циклов денатурации при 95 °C в течение 10 с, отжига праймеров при 62 °C в течение 10 с и элонгации 72 °C в течение 10 с. Заключительным этапом была терминальная элонгация при 72 °C в течение 10 минут.

Аликвоты (10 мкл) реакции разделяли по размеру на 1,2%-ном агарозном геле в ТАЕ-буфере, предварительно окрашенном бромистым этидием. Электрофорез проводили в агарозном геле размером 15×10 см в течение 2 часов при силе тока 200 мА, чтобы обеспечить хорошее разделение продуктов ПЦР. Продукты амплификации непосредственно количественно определяли путем сканирования интенсивности флуоресценции в УФ-свете с использованием системы гель-документирования ChemiDoc MP (Bio-Rad, США). Силу сигнала каждой амплифицированной полосы измеряли с использованием программного обеспечения для анализа изображений Image Lab версии 6.0.1 (Bio-Rad, США). Ген GAPDH использовали в качестве эталонного [23]. Три независимых репликации RT-PCR были выполнены для каждого гена, каждой стадии развития и генотипа, включая GAPDH. Экспрессию целевых генов оценивали относительно эталонного гена, рассчитывая путем деления сигнала ПЦР-ампликона гена целлюлозосинтазы на сигнал GAPDH.

Результаты и их обсуждение. В результате исследования были получены данные по экспрессии генов целлюлозосинтаз первичной и вторичной клеточной стенки для восьми образцов льна на пяти стадиях развития стебля.

На рисунке 1 представлен пример электрофоретического разделения продуктов амплификации кДНК гена целлюлозосинтазы CesA7 сорта Томский 16 и референсного гена GAPDH.

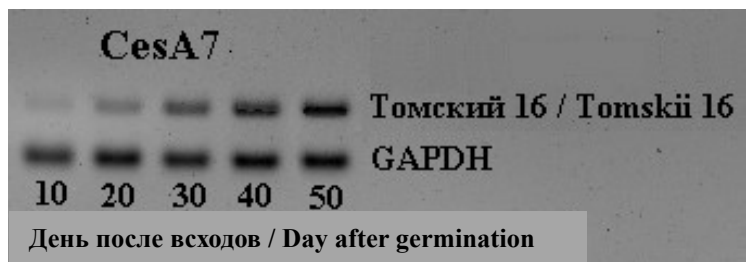


Рис. 1. Электрофореграмма разделения продуктов амплификации кДНК гена CesA7 сорта Томский 16 и гена GAPDH /

Fig. 1. Electropherogram of separation of cDNA amplification products of the CesA7 gene of the 'Tomskii 16' cultivar and the GAPDH gene

В таблице 3 приведены усредненные по результатам трех проб данные, отражающие значения экспрессии генов CesA1, CesA4, CesA6 и CesA7 относительно экспрессии гена GAPDH.

Таблица 3 – Экспрессия генов целлюлозосинтаз CesA1, CesA4, CesA6, CesA7 при развитии стебля восьми генотипов льна /

Table 3 – Expression of cellulose synthase genes CesA1, CesA4, CesA6, CesA7 during stem development of eight flax genotypes

Дни после всходов / Days after germination	Генотип / Genotype	Экспрессия относительно гена GAPDH / Expression relative to the GAPDH gene			
		CesA1	CesA6	CesA4	CesA7
10	Томский 16 / 'Tomskii 16'	0,226	0,098	0,183	0,214
	Визит / 'Vizit'	0,203	0,088	0,202	0,173
	Надежда / 'Nadezhda'	0,215	0,096	0,179	0,158
	Универсал / 'Universal'	0,186	0,091	0,18	0,257
	Синичка / 'Sinichka'	0,184	0,087	0,165	0,143
	РФН / RFN	0,281	0,083	0,152	0,159
	ЛМ 98 / LM 98	0,303	0,078	0,156	0,154
	<i>L. grandiflorum</i> Desf.	0,382	0,133	0,356	0,104
20	Томский 16 / 'Tomskii 16'	0,203	0,113	0,354	0,332
	Визит / 'Vizit'	0,186	0,105	0,392	0,389
	Надежда / 'Nadezhda'	0,192	0,108	0,312	0,325
	Универсал / 'Universal'	0,167	0,097	0,356	0,331
	Синичка / 'Sinichka'	0,158	0,101	0,321	0,308
	РФН / RFN	0,316	0,166	0,288	0,265
	ЛМ 98 / LM 98	0,308	0,156	0,312	0,291
	<i>L. grandiflorum</i> Desf.	0,412	0,213	0,322	0,215
30	Томский 16 / 'Tomskii 16'	0,161	0,102	0,543	0,584
	Визит / 'Vizit'	0,145	0,096	0,532	0,524
	Надежда / 'Nadezhda'	0,151	0,074	0,498	0,538
	Универсал / 'Universal'	0,135	0,085	0,538	0,495
	Синичка / 'Sinichka'	0,123	0,103	0,484	0,508
	РФН / RFN	0,262	0,135	0,466	0,493
	ЛМ 98 / LM 98	0,231	0,147	0,453	0,514
	<i>L. grandiflorum</i> Desf.	0,403	0,235	0,363	0,457
40	Томский 16 / 'Tomskii 16'	0,107	0,075	1,254	0,741
	Визит / 'Vizit'	0,096	0,064	1,186	0,841
	Надежда / 'Nadezhda'	0,1	0,049	1,289	0,883
	Универсал / 'Universal'	0,091	0,051	1,248	0,811
	Синичка / 'Sinichka'	0,086	0,06	0,915	0,764
	РФН / RFN	0,124	0,079	1,037	0,746
	ЛМ 98 / LM 98	0,111	0,113	0,942	0,751
	<i>L. grandiflorum</i> Desf.	0,268	0,138	0,687	0,824
50	Томский 16 / 'Tomskii 16'	0,054	0,034	0,922	0,993
	Визит / 'Vizit'	0,048	0,032	0,862	1,289
	Надежда / 'Nadezhda'	0,049	0,024	0,998	1,214
	Универсал / 'Universal'	0,046	0,026	0,924	1,275
	Синичка / 'Sinichka'	0,043	0,03	0,834	1,115
	РФН / RFN	0,072	0,043	0,711	1,052
	ЛМ 98 / LM 98	0,069	0,049	0,635	0,935
	<i>L. grandiflorum</i> Desf.	0,134	0,078	0,641	0,612

Экспрессия генов CesA1, CesA4, CesA7, CesA6 была обнаружена у всех восьми сортов на всех стадиях развития. Уровни и характер экспрессии исследуемых генов значительно варьировали.

Экспрессия гена CesA1 была невысокой и продемонстрировала различную динамику для сортов льна-долгунца, льна масличного и *L. grandiflorum* Desf. (рис. 2). Самый высокий уровень экспрессии гена отмечали в начале развития растений – на стадии проростков, затем

начинал снижаться. Экспрессия этого гена у сортов льна-долгунца была самой низкой из изученных образцов и характеризовалась линейным уменьшением величины в зависимости от возраста растений. У сортов льна масличного и *L. grandiflorum* Desf. экспрессия оказалась выше в 1,5–2,0 раза и характеризовалась иной зависимостью. После прохождения растением фазы, соответствующей быстрому росту, у сортов льна-долгунца отмечается снижение экспрессии CesA1.

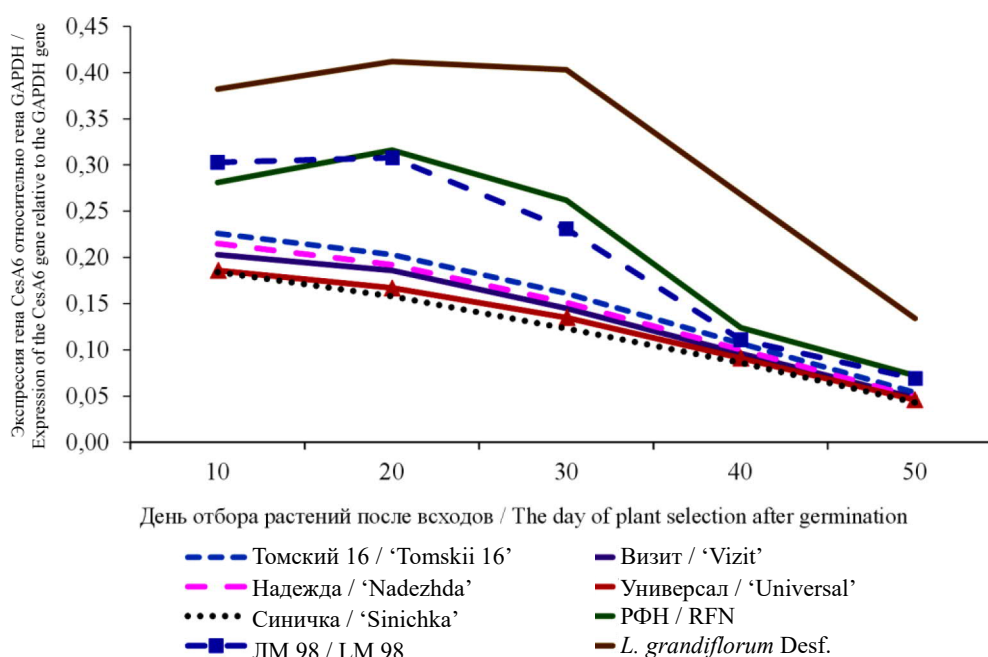


Рис. 2. Динамика экспрессии гена CesA1 относительно гена GAPDH в процессе онтогенеза у различных генотипов льна /

Fig. 2. Dynamics of expression of the CesA1 gene relative to the GAPDH gene during ontogenesis in various flax genotypes

Следующий изученный ген целлюлозо-синтазы CesA6 показал наиболее слабый уровень экспрессии из всех исследованных генов во всех образцах (рис. 3). Как и в случае с CesA1, паттерны экспрессии образцов прядильного и масличного льна, а также *L. grandiflorum* Desf. сильно отличались. Наибольший уровень экспрессии выявлен у *L. grandiflorum* Desf., который характеризовался подъемом до наступления фазы быстрого роста у растений льна и постепенным снижением в дальнейшем. Сопоставляя характер экспрессии CesA1 и CesA6, отмечается, что экспрессия генов ПКС у сортов масличного льна выше, чем у прядильного на всех стадиях развития растения, но со временем она принимает относительно равные значения.

Ген CesA4, связанный с образованием ВКС, характеризовался сходным проявлением экспрессии практически для всех образцов льна (рис. 4). Сорт льна-долгунца Синичка в фазе быстрого роста по уровню экспрессии оказался ближе к образцам масличного льна, а по характеру экспрессии – к *L. grandiflorum* Desf.

CesA7 – второй исследованный ген, связанный с образованием ВКС, демонстрирует постоянно растущий характер экспрессии в зависимости от возраста растений, идентичный для всех образцов культурного льна (рис. 5). Различия в уровне экспрессии наблюдали после 40-го дня развития растений. На 50-й день близкие результаты по уровню экспрессии показали оба сорта масличного льна, сорт льна-долгунца с невысоким содержанием волокна в стебле –

Синичка и высоковолокнистый сорт Томский 16. Сорт Томский 16 относится к группе раннеспелых сортов льна, а все другие исследуемые сорта

прядильного льна – к группе среднеспелых. *L. grandiflorum* Desf. проявил резкое снижение уровня экспрессии после 40-го дня развития.

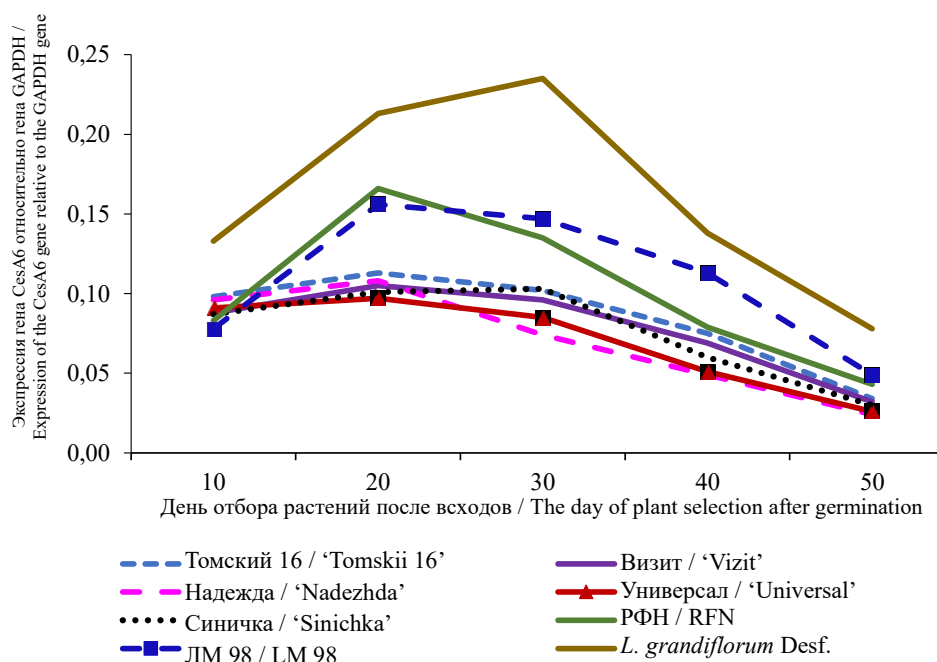


Рис. 3. Динамика экспрессии гена CesA6 относительно гена GAPDH в процессе онтогенеза у различных генотипов льна /

Fig. 3. Dynamics of expression of the CesA6 gene relative to the GAPDH gene during ontogenesis in various flax genotypes

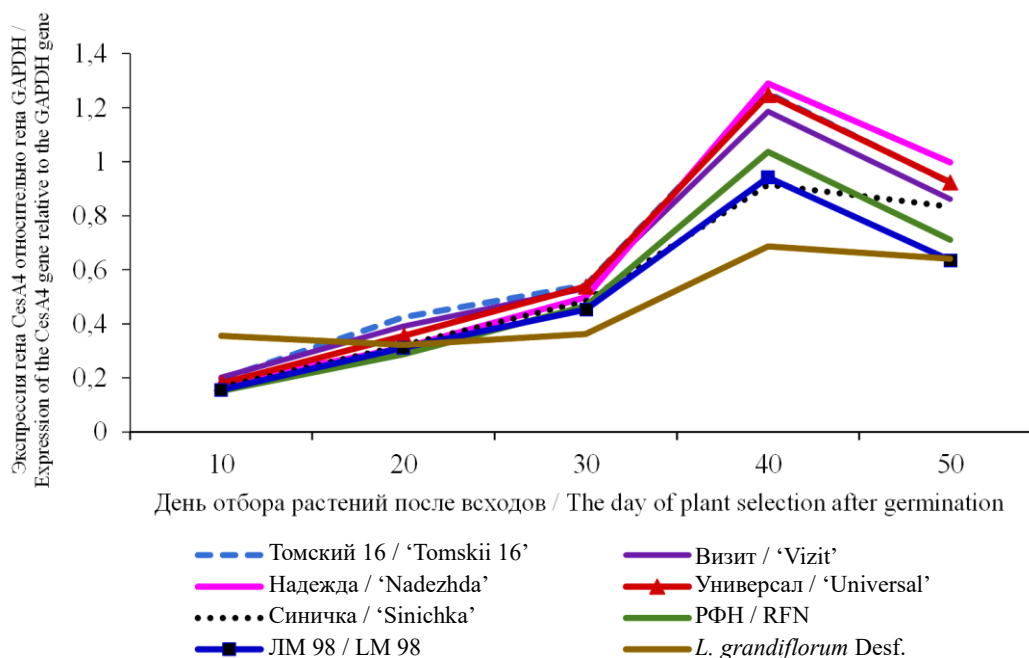


Рис. 4. Динамика экспрессии гена CesA4 относительно гена GAPDH в процессе онтогенеза у различных генотипов льна /

Fig. 4. Dynamics of expression of the CesA4 gene relative to the GAPDH gene during ontogenesis in various flax genotypes

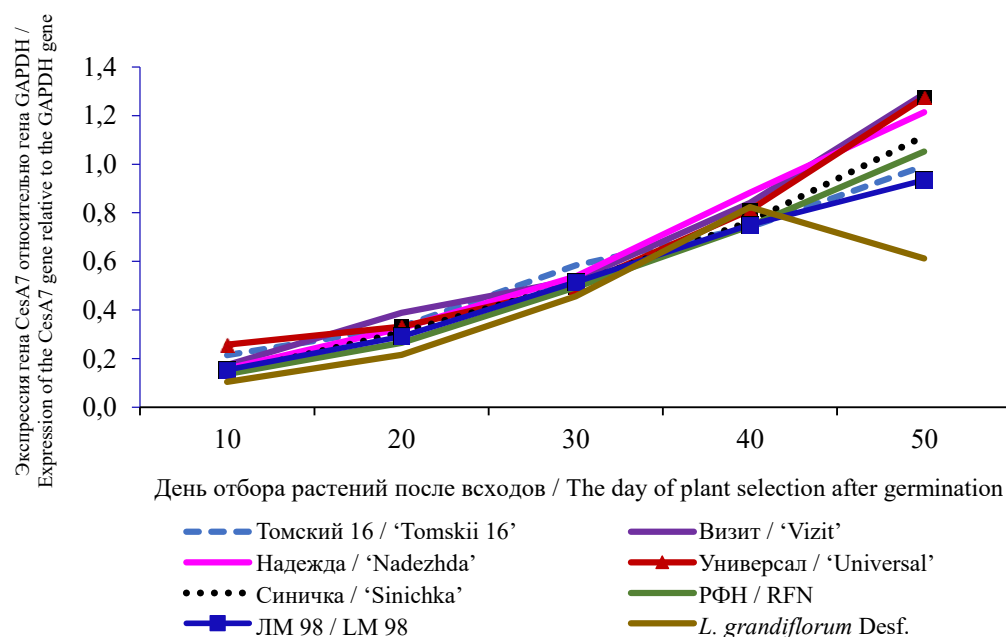


Рис. 5. Динамика экспрессии гена CesA7 относительно гена GAPDH в процессе онтогенеза у различных генотипов льна /

Fig. 5. Dynamics of expression of the CesA7 gene relative to the GAPDH gene during ontogenesis in various flax genotypes

Полученные данные указывают, что экспрессия изученных CesA генов у льна зависит от генотипа, стадии развития растений, особенностей формирования клеточных стенок. Во всех исследованных образцах льна гены, связанные с ВКС (CesA4 и CesA7), имели более высокий уровень экспрессии в стеблях, чем в проростках. В то же время уровни экспрессии, связанные с ПКС CesA1 и CesA6, на стадии быстрого роста были меньше, чем в проростках. Анализ показывает, что на более поздних стадиях развития растения активность генов ПКС начинает снижаться. Гены вторичной клеточной стенки увеличивают экспрессию на стадии быстрого роста.

Исследования экспрессии гена CesA6 указывают на сложность изучаемого процесса, что проявляется в неоднозначности получаемых результатов. Так, выявленный в настоящем исследовании уровень экспрессии очень низкий для всех образцов, что согласуется с результатами работы [24], но отличается от других работ сходной тематики [25, 26]. Возможно, это связано со структурой гена, состоящего как минимум из пяти паралогических последовательностей (А, В, С, D и Е).

Для определения значимости различий между уровнями экспрессии исследованных образцов был проведен кластерный анализ полученных данных методом евклидовых расстояний (рис. 6).

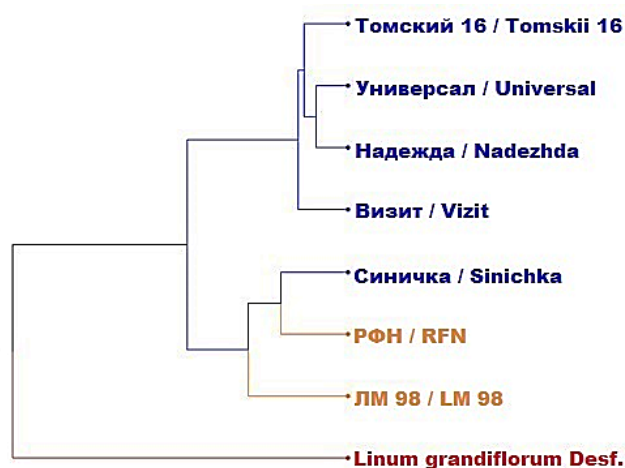


Рис. 6. Дендрограмма кластерного анализа исследованных образцов по экспрессии генов целлюлозосинтаз льна /

Fig. 6. Dendrogram of cluster analysis of the studied samples for the expression of cellulose synthase genes of flax

Кластерный анализ сгруппировал исследованные образцы, разделив друг от друга виды *Linum usitatissimum* L. и *L. grandiflorum* Desf., а также генотипы культурного льна на сорта льна-долгунца с высоким и средним содержанием волокна и группу, объединяющую сорта с низким содержанием волокна. Таким образом, характер и уровень экспрессии генов целлюлозосинтаз исследованных образцов льна связаны с содержанием волокна в стебле.

Заключение. Полученные данные показывают на генотип- и стадиоспецифичность процессов экспрессии генов целлюлозосинтаз семейства *CesA* в стебле льна. Оценка экспрессии генов целлюлозосинтаз льна в динамике роста

растений позволяет расширить представление о генетическом контроле развития льна. Целлюлозосинтазы первичной клеточной стенки проявляют динамику роста экспрессии до стадии «елочка», затем экспрессия постепенно снижается к фазе быстрого роста, тогда как целлюлозосинтазы вторичной клеточной стенки характеризуются постоянным увеличением экспрессии от первых дней развития проростков до стадии быстрого роста. Различия в экспрессии генов, выявленные между двумя видами льна *Linum usitatissimum* L. и *L. grandiflorum* Desf. на стадии быстрого роста, указывают на наличие особенностей функционирования генов, отвечающих за синтез целлюлозы в пределах рода *Linum*.

References

1. Dhaliwal J. S. Natural fibers: applications. Generation, development and modifications of natural fibers. London: IntechOpen, 2020. Pp. 1–23. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.86884>
2. Mohite S., Patil C. K. Linseed Biodiesel – A Review. FLAME 2022: Advances in Fluid and Thermal Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Singapore: Springer, 2023. Pp. 131–141. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-99-2382-3_11
3. Haag K., Padovani J., Fita S., Trouvé J., Pineau C., Hawkins S., De Jong H., Deyholos M., Chabbert B., Müssig J., Beaupré J. Influence of flax fibre variety and year-to-year variability on composite properties. Industrial Crops and Products. 2017;98:1–9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.12.028>
4. Pisupati A., Willaert L., Goethals F., Uyttendaele W., Park C. H. Variety and growing condition effect on the yield and tensile strength of flax fibers. Industrial crops and products. 2021;170:113736. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113736>
5. Kvavadze E., Bar-Yosef O., Belfer-Cohen A., Boaretto E., Jakeli N., Matskevich Z., Meshveliani T. 30,000-year-old wild flax fibers. Science. 2009;325(5946):1359. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1175404>
6. Gorshkova T., Chernova T., Mokshina N., Ageeva M., Mikshina P. Plant ‘muscles’: fibers with a tertiary cell wall. New Phytologist. 2018;218(1):66–72. DOI: <https://doi.org/10.1111/nph.14997>
7. Ageeva M., Petrovská B., Kieft H., Sal’nikov V., Snegireva A., Van Dam J., Van Veenendaal W., Emons A., Gorshkova T., Van Lammeren A. Intrusive growth of flax phloem fibers is of intercalary type. Planta. 2005;222:565–574. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00425-005-1536-2>
8. Snegireva A., Chernova T., Ageeva M., Lev-Yadun S., Gorshkova T. Intrusive growth of primary and secondary phloem fibres in hemp stem determines fibre-bundle formation and structure. AoB Plants. 2015;7:plv061. DOI: <https://doi.org/10.1093/aobpla/plv061>
9. Mokshina N., Chernova T., Galinousky D., Gorshkov O., Gorshkova T. Key stages of fiber development as determinants of bast fiber yield and quality. Fibers. 2018;6(2):20. DOI: <https://doi.org/10.3390/fib6020020>
10. Gorshkova T., Mokshina N., Chernova T., Ibragimova N., Salnikov V., Mikshina P., Tryfona T., Banasiak A., Immerzeel P., Dupree P., Mellerowicz E. Aspen tension wood fibers contain β -(1→4)-galactans and acidic arabinogalactans retained by cellulose microfibrils in gelatinous walls. Plant Physiology. 2015;169(3):2048–2063. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.15.00690>
11. Lampugnani E. R., Flores-Sandoval E., Tan Q. W., Mutwil M., Bowman J. L., Persson S. Cellulose synthesis – central components and their evolutionary relationships. Trends in Plant Science. 2019;24(5):402–412. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2019.02.011>
12. Daras G., Templalexis D., Avgeri F., Tsitsekian D., Karamanou K., Rigas S. Updating insights into the catalytic domain properties of plant cellulose synthase (CesA) and cellulose synthase-like (Csl) proteins. Molecules. 2021;26(14):4335. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules26144335>
13. Wilson T. H., Kumar M., Turner S. R. The molecular basis of plant cellulose synthase complex organisation and assembly. Biochemical Society Transactions. 2021;49(1):379–391. DOI: <https://doi.org/10.1042/BST20200697>
14. Haigler C. H., Roberts A. W. Structure/function relationships in the rosette cellulose synthesis complex illuminated by an evolutionary perspective. Cellulose. 2019;26:227–247. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10570-018-2157-9>
15. Purushotham P., Ho R., Zimmer J. Architecture of a catalytically active homotrimeric plant cellulose synthase complex. Science. 2020;369(6507):1089–1094. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.abb2978>
16. Roach M. J., Deyholos M. K. Microarray analysis of flax (*Linum usitatissimum* L.) stems identifies transcripts enriched in fibre-bearing phloem tissues. Molecular Genetics and Genomics. 2007;278:149–165. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00438-007-0241-1>
17. Mokshina N., Gorshkov O., Galinousky D., Gorshkova T. Genes with bast fiber-specific expression in flax plants – Molecular keys for targeted fiber crop improvement. Industrial crops and products. 2020;152:112549. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112549>
18. Горбова М. А., Мансапова А. И. Изучение сортов льна-долгунца томской селекции в подтаёжной зоне Омской области. Актуальные вопросы биологии, селекции, технологии возделывания и переработки сельскохозяйственных культур: сб. мат-лов 11-й Всеросс. конф. молодых учёных и специалистов. Краснодар: ФГБНУ ФНЦ ВНИИМК имени В. С. Пустовойта, 2021. С. 44–49. DOI: <https://doi.org/10.25230/conf11-2021-44-49>

Gorbova M. A., Mansapova A. I. Study of fiber flax varieties of Tomsk breeding in the subtaiga zone of the Omsk region. Topical issues of biology, breeding, technology of cultivation and processing of agricultural crops: collection of materials of the 11th All-Russian Conference of Young Scientists and specialists. Krasnodar: FGBNU FNTs VNIIMK imeni V. S. Pustovoyta, 2021. pp. 44–49. DOI: <https://doi.org/10.25230/conf11-2021-44-49>

19. Gorshkova T. A., Sal'nikov V. V., Chemikosova S. B., Ageeva M. V., Pavlencheva N. V., Van Dam J. E. The snap point: a transition point in *Linum usitatissimum* bast fiber development. Industrial Crops and Products. 2003;18(3):213–221. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0926-6690\(03\)00043-8](https://doi.org/10.1016/S0926-6690(03)00043-8)

20. Guenin S., Mauriat M., Pelloux J., Van Wuytswinkel O., Bellini C., Gutierrez L. Normalization of qRT-PCR data: the necessity of adopting a systematic, experimental conditions-specific, validation of references. Journal of experimental botany. 2009;60(2):487–493. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/ern305>

21. Kumar S., Jordan M. C., Datla R., Cloutier S. The LuWD40-1 gene encoding WD repeat protein regulates growth and pollen viability in flax (*Linum usitatissimum* L.). PLoS One. 2013;8(7):e69124. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0069124>

22. Thambugala D., Cloutier S. Fatty acid composition and desaturase gene expression in flax (*Linum usitatissimum* L.). Journal of Applied Genetics. 2014;55:423–432. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13353-014-0222-0>

23. Huis R., Hawkins S., Neutelings G. Selection of reference genes for quantitative gene expression normalization in flax (*Linum usitatissimum* L.). BMC plant biology. 2010;10:71. DOI: <https://doi.org/10.1186/1471-2229-10-71>

24. Galinovsky D., Padvitskiy T., Bayer G., Pirkov Y., Pydiura N., Anisimova N., Nikitinskaya T., Khotyleva L., Yemets A., Kilchevsky A., Blume Ya. Expression analysis of cellulose synthase and main cytoskeletal protein genes in flax (*Linum usitatissimum* L.). Cell Biology International. 2019;43(9):1065–1071. DOI: <https://doi.org/10.1002/cbin.10837>

25. Chantreau M., Chabbert B., Billiard S., Hawkins S., Neutelings G. Functional analyses of cellulose synthase genes in flax (*Linum usitatissimum*) by virus-induced gene silencing. Plant biotechnology journal. 2015;13(9):1312–1324. DOI: <https://doi.org/10.1111/pbi.12350>

26. Mokshina N., Gorshkova T., Deyholos M. K. Chitinase-like (CTL) and cellulose synthase (CESA) gene expression in gelatinous-type cellulosic walls of flax (*Linum usitatissimum* L.) bast fibers. PLoS One. 2014;9(6):e97949. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0097949>

Сведения об авторах

✉ **Базанов Тарас Александрович**, кандидат хим. наук, заведующий лабораторией молекулярно-генетических исследований и клеточной селекции, ведущий научный сотрудник, ФГБНУ «Федеральный научный центр лубяных культур», Комсомольский проспект, д. 17/56, г. Тверь, Российская Федерация, 170041, e-mail: info@fncl.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9544-5528>, e-mail: t.bazanov@fncl.ru

Ушаповский Игорь Валентинович, кандидат биол. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории молекулярно-генетических исследований и клеточной селекции, заместитель директора по науке, ФГБНУ «Федеральный научный центр лубяных культур», Комсомольский проспект, д. 17/56, г. Тверь, Российская Федерация, 170041, e-mail: info@fncl.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0602-1211>

Логина Наталья Николаевна, научный сотрудник лаборатории молекулярно-генетических исследований и клеточной селекции, ФГБНУ «Федеральный научный центр лубяных культур», Комсомольский проспект, д. 17/56, г. Тверь, Российская Федерация, 170041, e-mail: info@fncl.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4633-392X>

Минина Екатерина Витальевна, аспирант, младший научный сотрудник лаборатории молекулярно-генетических исследований и клеточной селекции, ФГБНУ «Федеральный научный центр лубяных культур», Комсомольский проспект, д. 17/56, г. Тверь, Российская Федерация, 170041, e-mail: info@fncl.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6559-9577>

Вересова Полина Дмитриевна, младший научный сотрудник лаборатории молекулярно-генетических исследований и клеточной селекции, ФГБНУ «Федеральный научный центр лубяных культур», Комсомольский проспект, д. 17/56, г. Тверь, Российская Федерация, 170041, e-mail: info@fncl.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7797-2578>

Information about the authors

✉ **Taras A. Bazanov**, PhD in Chemical Science, Head of the Laboratory of the molecular-genetic researches and cell selection, leading researcher, Federal Research Center for Bast Fiber Crops, Komsomolsky prospect, 17/56, Tver, Russian Federation, 170041, e-mail: info@fncl.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9544-5528>, e-mail: t.bazanov@fncl.ru

Igor V. Ushapovsky, PhD in Biological Science, leading researcher, the Laboratory of the molecular-genetic researches and cell selection, Deputy Director for Science, Federal Research Center for Bast Fiber Crops, Komsomolsky prospect, 17/56, Tver, Russian Federation, 170041, e-mail: info@fncl.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0602-1211>

Natalya N. Loginova, researcher, the Laboratory of the molecular-genetic researches and cell selection, Federal Research Center for Bast Fiber Crops, Komsomolsky prospect, 17/56, Tver, Russian Federation, 170041, e-mail: info@fncl.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4633-392X>

Ekaterina V. Minina, postgraduate, junior researcher, the Laboratory of the molecular-genetic researches and cell selection, Federal Research Center for Bast Fiber Crops, Komsomolsky prospect, 17/56, Tver, Russian Federation, 170041, e-mail: info@fncl.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6559-9577>

Polina D. Veresova, junior researcher, the Laboratory of the molecular-genetic researches and cell selection, Federal Research Center for Bast Fiber Crops, Komsomolsky prospect, 17/56, Tver, Russian Federation, 170041, e-mail: info@fncl.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7797-2578>

✉ – Для контактов / Corresponding author



Оценка сортов смородины красной по продуктивности и товарным качествам

© 2024. О. Д. Голяева✉

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

Цель исследований – изучить урожайность, основные компоненты продуктивности 9 сортов смородины красной раннего и среднего сроков созревания из биоресурсной коллекции Всероссийского научно-исследовательского института селекции плодовых культур и оценить степень стабильности признаков. Исследования проводили в 2020, 2022, 2023 гг. в условиях Орловской области. Коллекционный участок заложен осенью 2015 г. по схеме 3,5х0,5 м. У изучаемых сортов длина кисти значительно варьировала по годам от 20,0 (Вика) до 35,6 % (Красная Кузьмина) в зависимости от метеорологических условий вегетационного периода. В среднем за годы изучения длина кисти контрольного сорта Йонкер ван Тетс ('Jonkheer van Tets') составила 8,6 см и только сорт Красная Кузьмина имел существенные отличия от контроля по длине кисти – 10,9 см. Крупноплодность проявил сорт Нива, средняя масса ягоды за три года составила 0,76 г и существенно превысила контрольный сорт (0,54 г). Остальные вошли в группу сортов со средней массой ягоды. Значения признака «масса ягоды» очень сильно изменялись по годам, коэффициент вариации (CV) составил от 8,4 % (Йонкер ван Тетс) до 31,7 % (Нива). Выравненность ягод в кисти характеризовались сорта Натали и Вика. В среднем за три года получена урожайность от 14,3 т/га (CV = 48,7 %) у сорта Красный крест ('Red Cross') до 25,6 т/га (CV = 10,7 %) у сорта Газель. Высокой стабильной урожайностью и параметрами компонентов продуктивности выделились сорта Газель, Ася, Подарок победителям. Сорт Нива характеризовался крупноплодностью и высокой урожайностью, но меньшей стабильностью по годам. Сорт Красный крест в условиях Орловской области не реализовал свой генетический потенциал продуктивности.

Ключевые слова: *Ribes rubrum* L., урожайность, длина кисти, масса ягод, выравненность ягод, коэффициент вариации, гидротермические условия

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 23-26-00160). Автор благодарит рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Конфликт интересов: автор заявил об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Голяева О. Д. Оценка сортов смородины красной по продуктивности и товарным качествам. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2024;25(3):379–387. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.3.379-387>

Поступила: 03.04.2024

Принята к публикации: 24.05.2024

Опубликована онлайн: 26.06.2024

Evaluation of red currant varieties according to productivity and marketability

© 2024. Olga D. Golyaeva✉

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

The purpose of the research is to study the yield and the main components of the productivity of 9 red currant cultivars of early and medium maturation from the bioresource collection of the Russian Research Institute of Fruit Crop Breeding and to assess the degree of stability of the traits. The study was carried out in 2020, 2022, 2023 in the Orel region. The collection plot was laid in autumn 2015 according to the scheme 3.5 x 0.5 m. In the studied cultivars, the raceme length varied significantly over the years from 20.0 % ('Vika') to 35.6 % ('Krasnaya Kuzmina'), depending on the meteorological conditions of the growing season. On average, over the years of study, the raceme length of the control 'Jonkheer van Tets' cultivar was 8.6 cm, and only the 'Krasnaya Kuzmina' cultivar had significant differences from the control in raceme length – 10.9 cm. The 'Niva' cultivar showed large fruit, the average berry weight for three years was 0.76 g and significantly exceeded the control cultivar (0.54 g). The rest cultivars were included in the group with an average berry weight. The values of the berry weight varied greatly over the years. The variation coefficient (CV) ranged from 8.4 % ('Jonkheer van Tets') to 31.7 % ('Niva'). The cultivars 'Natalie' and 'Vika' were characterized by the uniformity of the berries in the raceme. On average, over 3 years, the cultivars showed high yields from 14.3 t/ha in 'Red Cross' (CV 48.7 %) to 25.6 t/ha in 'Gazel' (CV 10.7 %). 'Gazel', 'Asya' and 'Podarok Pobeditel' were distinguished by high stable yields and parameters of productivity components. 'Niva' was characterized by large size of fruit and high yield, but it had less stability over the years. 'Red Cross' did not realize its genetic productivity potential in the conditions of the Orel region.

Keywords: *Ribes rubrum* L., yield, raceme length, berry weight, uniformity of berries, variation coefficient, hydrothermal conditions

Acknowledgements: the research was carried out under the financial support of the Russian Science Foundation (Grant No. 23-26-00160).

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

Conflict of interests: the author stated that there was no conflict of interests.

For citation: Golyaeva O. D. Evaluation of red currant varieties according to productivity and marketability. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2024;25(3):379–387. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.3.379-387>

Received: 03.04.2024

Accepted for publication: 24.05.2024

Published online: 26.06.2024

Смородина красная – ценная ягодная культура, плоды которой богаты питательными и биологически активными веществами [1, 2, 3, 4]. Широко распространена в любительском садоводстве РФ, в последнее время возрастает к ней интерес со стороны фермеров и крупных производителей. Для возрождения промышленной культуры красной смородины необходимы сорта высокоурожайные, высокотоварные, устойчивые к био- и абиотическим факторам среды. Высокий потенциал устойчивости позволяет возделывать этот ягодный кустарник во многих регионах РФ. Биологические особенности растения обеспечивают ежегодную урожайность. Часто повторяющиеся неблагоприятные погодноклиматические условия, характерные для значительной части территории России, являются одной из основных причин снижения урожайности и больших экономических потерь. Одним из основных путей получения стабильных урожаев является выращивание высокоадаптивных к условиям произрастания сортов. Изучение урожайности и компонентов продуктивности сортов смородины красной проводилось в разных почвенно-климатических зонах: в условиях Северного и Северо-Западного регионов [5, 6], средней полосы России [7, 8], Уральского региона [9, 10], Центральной Якутии [11], Прибалтики [12], Западной Европы [13] для создания сортамента, наиболее полно реализующего свой биологический потенциал в данном регионе.

Возрастающая нестабильность погодноклиматических условий повышает актуальность изучения сочетания высокого продукционного потенциала сортов с достаточным уровнем адаптации к неблагоприятным факторам окружающей среды.

Цель исследований – изучить урожайность, основные компоненты продуктивности сортов смородины красной раннего и среднего сроков созревания из биоресурсной коллекции Всероссийского научно-исследовательского института селекции плодовых культур и оценить

степень стабильности признаков в условиях Орловской области.

Научная новизна – оценка степени стабильности экономически значимых признаков сортов, от которых зависит рентабельность промышленного возделывания смородины красной.

Материал и методы. Исследования проводили на участке биоресурсной коллекции смородины красной ФГБНУ ВНИИСПК (Орловская область) в 2020, 2022, 2023 гг. Орловская область располагается в центре Среднерусской возвышенности (Центрально-Черноземный регион (ЦЧР)). В качестве объектов изучения были взяты 9 сортов смородины красной раннего и среднего сроков созревания, внесенные в Госреестр селекционных достижений, допущенных к использованию в РФ¹, и перспективные для использования (табл. 1). Сорта получены на основе трех видов смородины красной: обыкновенная – *Ribes vulgare* Lam., красная – *R. rubrum* L., скалистая – *R. petreum* Wulf. В качестве контроля служил Йонкер ван Тетс – промышленный сорт в Европе и широко распространенный на территории России, районированный в ЦЧР.

Коллекционный участок заложен осенью 2015 г. по схеме 3,5×0,5 м (5714 растений на га). Почва на участке серая лесная среднеоподзоленная тяжелосуглинистая по механическому составу. Агротехника общепринятая в ЦЧР.

В условиях Орловской области цветение смородины красной наблюдается в конце апреля – начале мая, начало созревания ягод раннего и среднего сроков – середина и конец июня соответственно. Гидротермические показатели с апреля по июнь представлены в таблице 2. Погода этого периода определяет условия опыления, завязывания ягод и формирования урожая.

Исследования основных компонентов продуктивности и урожайности сортов смородины красной проводили согласно общепринятой методике сортоизучения плодовых и ягодных культур².

¹Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию. Т. 1. Сорта растений. М., 2022. С. 414–415.

²Программа и методика сортоизучения плодовых, ягодных и орехоплодных культур. Под общ. ред. Е. Н. Седова, Т. П. Огольцовой. Орел: Изд-во ВНИИСПК, 1999. 608 с.

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ: РАСТЕНИЕВОДСТВО / ORIGINAL SCIENTIFIC ARTICLES: PLANT GROWING

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

Сорт смородины красной / Name of the red currant cultivar	Срок созревания / Date of ripening	Происхождение / Origin	Страна создания сорта / Country of origin of the cultivar	Регион до- пуска / Admission region
Йонкер ван Тетс (к) / 'Jonkheer van Tets' (c)	Ранний / Early	Файя Плодородная × Рынок Лондона / 'Fay's Prolific' × 'London Market'	Нидерланды / Netherlands	2, 4, 5
Ася / 'Asya'		Чулковская × Маарсес Проминент / 'Chulkovskaya' × 'Maarses Prominent'	Россия / Russian Federation	5, 10, 12
Нива / 'Niva'		Миннесота × Чулковская / 'Minnesota' × 'Chulkovskaya'		3, 5, 10
Подарок победителям / 'Podarok Pobeditelyam'	Среднеранний / Moderately early	Чулковская × Миннесота / 'Chulkovskaya' × 'Minnesota'		-
Красная Кузьмина / 'Krasnaya Kuzmina'		Неизвестно \ Unknown		-
Вика / 'Vika'	Средний / Mid-ripening	Чулковская × Ред Лейк / 'Chulkovskaya' × 'Red Lake'		4, 5, 7, 10
Газель / 'Gazel'		Чулковская × Маарсес Проминент / 'Chulkovskaya' × 'Maarses Prominent'		5, 10
Натали / 'Natalie'		От межсортных скрещиваний / From intervarietal crossings		2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 11
Красный крест / 'Red Cross'		Вишневая × Белый виноград / 'Cherry' × 'White grape'	США / USA	3, 4, 7, 8, 9, 10, 11

Таблица 2 – Характеристика погодных условий в вегетационный период изучения /
Table 2 – Weather conditions during the growing period

Месяц, декада / Month, decade	2020 г.		2022 г.		2023 г.		Среднегодовья / Average annual	
	t, °C	осадки, мм / precipitation, mm	t, °C	осадки, мм / precipitation, mm	t, °C	осадки, мм / precipitation, mm	t, °C	сумма осадков, мм / precipitation amount, mm
Апрель / April								
I	4,4	0,7	3,0	56,5	7,4	0	-	-
II	5,2	4,2	5,5	60,2	8,6	0	-	-
III	7,7	5,1	7,4	28,7	9,8	26,6	-	-
Среднее / Average	5,7	-	5,3	-	8,6	-	7,9	-
Сумма / Sum	-	10,0	-	145,4	-	26,6	-	42,6
Май / May								
I	12,0	11,6	9,8	8,3	7,8	3,7	-	-
II	10,7	1,1	11,1	11,5	13,8	0,4	-	-
III	11,2	46,4	11,7	18,5	14,9	4,9	-	-
Среднее / Average	11,3	-	10,9	-	12,3	-	13,0	-
Сумма / Sum	-	59,1	-	38,3	-	9,0	-	53,0
Июнь / June								
I	16,8	24,0	17,9	0	14,6	1,3	-	-
II	22,0	1,2	19,0	17,6	16,7	1,5	-	-
III	21,0	21,2	20,4	25,0	16,5	34,0	-	-
Среднее / Average	19,9	-	19,1	-	15,9	-	16,9	-
Сумма / Sum	-	46,4	-	42,6	-	36,8	-	61,0

Статистическая обработка полученного экспериментального материала проведена с помощью дисперсионного анализа по методике Б. М. Доспехова³ с использованием компьютерной программы Microsoft Office Excel.

Результаты и их обсуждение. Для смородины красной длина кисти и количество ягод в ней являются важными компонентами продуктивности, влияющими на урожайность сорта и товарность продукции при сборе урожая кистями. Промеры, выполненные в 2020 г., показали, что

кисть у большинства взятых в изучение сортов была короткой, согласно используемой методике, сорта Вика и Газель имели среднюю кисть (табл. 3). В 2022 г. только у сорта Красная Кузьмина длина кисти превысила 10 см, у остальных сортов кисть была средней длины. В 2023 г. сорта, кроме одного – Красный Крест, характеризовались длинной кистью. Культивары Газель, Красная Кузьмина, Подарок победителям по длине кисти существенно превосходили контроль – сорт Йонкер ван Тетс.

Таблица 3 – Длина кисти с черешком сортов смородины красной, см /
Table 3 – The length of red currant raceme with the petiole, cm

<i>Copt / Cultivar</i>	2020 г.	2022 г.	2023 г.	<i>Среднее / Average</i>	<i>CV, %</i>
Йонкер ван Тетс (к) / 'Jonkheer van Tets' (c)	6,8	8,6	10,3	8,6	20,4
Ася / 'Asya'	5,8	9,9	11,4	9,0	32,1
Вика / 'Vika'	8,8*	9,2	12,5*	10,2	20,0
Газель / 'Gazel'	10,0*	9,0	13,2*	10,7	20,4
Красная Кузьмина / 'Krasnaya Kuzmina'	7,4	10,3	15,1*	10,9*	35,6
Натали / 'Natalie'	6,0	9,3	10,4	8,6	26,9
Нива / 'Niva'	7,6	9,9	11,8	9,8	21,5
Подарок победителям / 'Podarok Pobeditelyam'	7,6	9,3	14,1*	10,3	32,6
Красный Крест / 'Red Cross'	6,3	10,0	8,5	8,3	23,0
HCP ₀₅ / LSD ₀₅	1,5	F _{факт} < F ₀₅	2,0	2,2	-

*Существенно превышает контроль при 5%-ном уровне значимости /

*Significantly exceeds the control at a 5% significance level

Исследования показали, что длина кисти у изучаемых сортов значительно варьирует по годам в зависимости от метеорологических условий вегетационного периода. Более стабильным данный признак отмечен у сорта Вика, коэффициент вариации составил 20 %. У остальных сортов изменчивость признака варьировала от 20,4 % (Йонкер ван Тетс, Газель) до 35,6 % (Красная Кузьмина).

По результатам дисперсионного анализа изменчивость длины кисти в данной группе

сортов на 65 % обусловлена условиями вегетационного периода (табл. 4). Сорт в нашем исследовании не оказал большого влияния как фактор вариации этого признака. Из данных таблицы 4 видно, что за три года в среднем только один сорт имел существенные отличия от контроля по длине кисти. Незначительное варьирование между сортами можно объяснить их генетическим происхождением (табл. 1).

Таблица 4 – Результаты дисперсионного анализа по влиянию изучаемых факторов на длину кисти сортов смородины красной /
Table 4 – The results of the analysis of variance according to the influence of the studied factors on the raceme length of red currant cultivars

<i>Источник вариации / Variation source</i>	<i>Сумма квадратов (SS) / Sum of squares (SS)</i>	<i>Степень свободы (df) / Degree of freedom (df)</i>	<i>Средний квадрат (MS) / Middle square (MS)</i>	<i>F_{факт} / F_{factual}</i>	<i>F_{теор} / F_{theoretical}</i>	<i>Доля влияния фактора, % / Factor's influence share, %</i>
Сорт / Cultivar	24,3	8	3,0	1,8	2,6	-
Год / Year	93,5	2	46,7	27,8	3,6	65,0

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

Масса ягоды является важным компонентом продуктивности. Анализ современных сортов смородины черной показал, что прирост урожайности обеспечивался за счет увеличения массы ягоды и повышения самоплодности [14]. Было определено, что урожайность и крупноплодность сорта находятся в тесной корреляционной зависимости ($r = 0,75 \dots 0,89$) [15, 16].

Масса и одномерность ягод являются основными показателями товарности продукции: крупные, одномерные ягоды особенно востребованы для потребления в свежем виде и заморозки.

Согласно полученным данным (табл. 5), контрольный сорт Йонкер ван Тетс за период 2020–2023 гг. характеризовался стабильной средней массой ягоды ($CV = 8,4\%$). По литературным источникам, он является крупноплодным, однако во многих почвенно-климатических зонах сорт не реализует полностью данный признак [9, 13]. Крупноплодность проявляет

сорт Нива, средняя масса ягоды в среднем за три года составила 0,76 г и существенно превысила контрольный. Остальные вошли в группу сортов со средней массой ягоды. Значения показателя «масса ягоды» очень сильно изменялись по годам, коэффициент вариации у большинства сортов был высоким. По этому признаку резко выделяется 2022 г. – сорта Йонкер ван Тетс, Красный крест, Нива и Подарок победителям имели среднюю массу ягоды, остальные – мелкую. Вероятно, на формирование ягоды отрицательно сказалась жаркая сухая погода, стоявшая всю первую декаду июня 2022 г., при среднедекадной температуре 17,9 °С осадков не было (табл. 2). Прохладная погода июня 2023 г. положительно повлияла на величину ягод, самые крупные имели сорта Нива, Красная Кузьмина, Ася, максимальная масса составила соответственно 1,63; 1,41; 1,26 г.

Таблица 5 – Масса ягоды сортов смородины красной, г /
Table 5 – Berry weight of red currant cultivars, g

Сорт / Cultivar	2020 г.	2022 г.	2023 г.	Среднее / Average	CV, %
Йонкер ван Тетс (к) / 'Jonkheer van Tets' (с)	$\frac{0,58}{0,94}$	$\frac{0,49}{0,93}$	$\frac{0,54}{0,96}$	$\frac{0,54}{0,94}$	$\frac{8,4}{1,6}$
Ася / 'Asya'	$\frac{0,71 *}{1,09 *}$	$\frac{0,38}{0,79}$	$\frac{0,81 *}{1,26}$	$\frac{0,63}{1,05}$	$\frac{30,3}{22,7}$
Вика / 'Vika'	$\frac{0,50}{0,86}$	$\frac{0,42}{0,70}$	$\frac{0,55}{0,83}$	$\frac{0,49}{0,8}$	$\frac{13,4}{10,7}$
Газель / 'Gazel'	$\frac{0,65}{1,22 *}$	$\frac{0,40}{0,74}$	$\frac{0,53}{1,11}$	$\frac{0,53}{1,02}$	$\frac{23,7}{24,6}$
Красная Кузьмина / 'Krasnaya Kuzmina'	$\frac{0,55}{1,10 *}$	$\frac{0,43}{0,72}$	$\frac{0,74 *}{1,41}$	$\frac{0,57}{1,08}$	$\frac{27,3}{32,1}$
Натали / 'Natalie'	$\frac{0,58}{0,96}$	$\frac{0,34}{0,74}$	$\frac{0,51}{0,79}$	$\frac{0,48}{0,83}$	$\frac{14,8}{13,9}$
Нива / 'Niva'	$\frac{0,85 *}{1,26 *}$	$\frac{0,49}{0,90}$	$\frac{0,95 *}{1,63}$	$\frac{0,76 *}{1,26}$	$\frac{31,7}{28,9}$
Подарок победителям / 'Podarok Pobeditelyam'	$\frac{0,48}{0,88}$	$\frac{0,51}{1,10}$	$\frac{0,69 *}{1,12}$	$\frac{0,56}{1,03}$	$\frac{20,3}{12,9}$
Красный Крест / 'Red Cross'	$\frac{0,68}{1,06}$	$\frac{0,50}{0,99}$	$\frac{0,49}{0,94}$	$\frac{0,57}{1,0}$	$\frac{19,2}{6,0}$
Среднее / Average	$\frac{0,62}{1,04}$	$\frac{0,44}{0,85}$	$\frac{0,65}{1,12}$	$\frac{0,57}{1,00}$	-
Коэффициент вариации, CV, % / Variation coefficient, CV, %	$\frac{18,7}{13,6}$	$\frac{9,0}{16,6}$	$\frac{24,9}{24,8}$	$\frac{14,4}{13,7}$	-
HCP ₀₅ / LSD ₀₅	$\frac{0,12}{0,14}$	$\frac{0,09}{0,15}$	$\frac{0,10}{0,15}$	$\frac{0,17}{\text{Ффакт} < \text{Fтеор}}$	-

Примечания: * Существенно превышает контроль при 5%-ном уровне значимости; числитель – средняя масса ягоды, знаменатель – максимальная масса ягоды /

Notes: * Significantly exceeds the control at a 5% level of significance; the numerator is the average, the denominator is the maximum weight of the berry

По итогам проведенного дисперсионного анализа, 31,6 % фенотипического варьирования массы ягоды вызваны гидротермическими

условиями в период цветения и формирования ягод (табл. 6).

Таблица 6 – Результаты дисперсионного анализа по влиянию изучаемых факторов на массу ягоды сортов смородины красной /

Table 6 – The results of the analysis of variance according to the influence of the studied factors on the berry weight of red currant cultivars

Источник вариации / Variation source	Сумма квадратов (SS) / Sum of squares (SS)	Степень свободы (df) / Degree of freedom (df)	Средний квадрат (MS) / Middle square (MS)	$F_{факт} / F_{factual}$	$F_{теор} / F_{theoretical}$	Доля влияния фактора, % / Factor's influence share, %
Сорт / Cultivar	0,17	8	0,02	2,2	2,6	-
Год / Year	0,19	2	0,1	9,8	3,7	31,6

Одномерность ягод влияет на товарность продукции. Согласно техническим требованиям ГОСТ 6829-2015⁴, ягоды смородины высшего и первого сорта должны быть однородными по размеру и окраске. Для смородины красной, у которой ягоды собраны в кисть, характерно, что ягода у основания кисти крупнее ягоды, находящейся на ее верхушке. У сортов различия по массе ягод в кисти выражены в разной степени, только немногие сорта имеют в кисти относительно выравненные ягоды.

Для определения одномерности массы ягоды в кисти для сортов, взятых в изучение, использовали коэффициент вариации. В статистике принято считать, что, если значение коэффициента вариации менее 33 %, то совокупность данных является однородной, если более 33% – неоднородной⁵. В данной группе сортов смородины красной наиболее выравненными ягодами характеризовался сорт Натали, за годы наблюдений коэффициент вариации не превышал 30 %, в среднем за три года был самым низким среди сортов и составил 23,9 % (табл. 7).

Таблица 7 – Изменчивость массы ягоды сортов смородины красной в кисти, CV, % /

Table 7 – Variability of berry weight of red currant cultivars in the raceme, CV, %

Copt / Cultivar	2020 г.	2022 г.	2023 г.	Среднее / Average
Йонкер ван Тетс (к) / 'Jonkheer van Tets' (с)	29,7	39,9	34,1	34,6
Ася / 'Asya'	31,3	35,8	20,2	29,1
Вика / 'Vika'	30,0	31,1	25,7	28,9
Газель / 'Gazel'	33,0	37,6	34,4	35,0
Красная Кузьмина / 'Krasnaya Kuzmina'	41,6	30,7	31,4	34,6
Натали / 'Natalie'	26,7	24,6	20,3	23,9
Нива / 'Niva'	26,3	40,0	32,2	32,8
Подарок победителям / 'Podarok Pobeditelyam'	32,2	41,4	25,3	33,0
Красный Крест / 'Red Cross'	33,0	42,0	41,6	38,9

В условиях Северо-Запада России наиболее одномерные ягоды также отмечались у сорта Натали⁶. Следует отметить сорт Вика, у которого ягоды стабильно однородные по годам, коэффициент вариации не превышал 33 %.

У сортов Ася, Нива, Подарок победителям отмечалась вариация массы ягоды в кисти от одномерной величины в 2020 и 2023 гг. до невыравненных в 2022 г. Наиболее высокий коэффициент вариации массы ягоды в кисти отмечен у сорта Красный крест – 38,9 %.

Урожайность – один из основных критериев оценки хозяйственной ценности сорта.

Сорт должен обладать не только высокой потенциальной продуктивностью, но и высокой адаптивностью к действию многих неблагоприятных факторов окружающей среды. Низкие температуры и оттепели зимой, поздневесенние заморозки, продолжительные дожди во время цветения растений и в период созревания ягод, жара и засуха летом, массовое развитие вредителей и распространение болезней – каждая из этих причин может привести к резкому снижению урожайности и качества продукции.

⁴ГОСТ 6829-2015. Смородина черная свежая. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2016. 17 с.

URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293757/4293757941.pdf>

⁵Математические методы в биологии и экологии. С. 9. URL: https://lab314.brsu.by/sil/sil_BC/sil_BC/sil_labs/sil_118/MM.pdf

⁶Голод Т. А. Оценка исходного материала красной смородины для селекции и практики в условиях Северо-Запада России: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Орел, 2021. 21 с.

Средняя урожайность за три года изучения сорта Йонкер ван Тетс (контроль) составила 2,7 кг/куст (15,5 т в пересчете на 1 га). Изменчивость по годам этого экономически значимого признака была очень высокой – 63,1 %,

что свидетельствует о низкой экологической стабильности сорта. Высокой и стабильной урожайностью выделился сорт Газель – 4,5 кг/куст (25,6 т/га) при CV = 10,2 % (табл. 8).

Таблица 8 – Продуктивность сортов смородины красной, кг/куст / т/га /
Table 8 – Productivity of red currant cultivars, kg/bush / t/ha

Сорт / Cultivar	2020 г.	2022 г.	2023 г.	Среднее / Average	Отклонение от контроля / Deviation from control	CV, %
Йонкер ван Тетс (к) / 'Jonkheer van Tets' (с)	$\frac{1,25}{7,1}$	$\frac{4,6}{26,3}$	$\frac{2,3}{13,1}$	$\frac{2,7}{15,5}$	-	$\frac{63,1}{63,4}$
Ася / 'Asya'	$\frac{3,4 *}{19,4 *}$	$\frac{3,8}{21,7}$	$\frac{4,5 *}{25,7 *}$	$\frac{3,9}{22,3}$	$\frac{1,2}{6,8}$	$\frac{14,3}{14,3}$
Вика / 'Vika'	$\frac{5,6 *}{32,0 *}$	$\frac{2,1}{12,0}$	$\frac{4,4 *}{25,2 *}$	$\frac{4,0}{23,1}$	$\frac{1,3}{7,6}$	$\frac{44,1}{44,1}$
Газель / 'Gazel'	$\frac{4,4 *}{25,1 *}$	$\frac{5,0}{28,6}$	$\frac{4,1 *}{23,2 *}$	$\frac{4,5}{25,6}$	$\frac{1,8}{10,1}$	$\frac{10,2}{10,7}$
Красная Кузьмина / 'Krasnaya Kuzmina'	$\frac{1,8 *}{10,3 *}$	$\frac{4,1}{23,4}$	$\frac{2,1}{12,0}$	$\frac{2,7}{15,5}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{46,9}{46,7}$
Натали / 'Natalie'	$\frac{2,0 *}{11,4 *}$	$\frac{3,9}{22,5}$	$\frac{2,2}{13,0}$	$\frac{2,7}{15,5}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{38,7}{38,4}$
Нива / 'Niva'	$\frac{3,1 *}{17,7 *}$	$\frac{5,0}{28,6}$	$\frac{5,1 *}{29,1 *}$	$\frac{4,4}{25,1}$	$\frac{1,7}{9,6}$	$\frac{25,6}{25,6}$
Подарок победителям / 'Podarok Pobeditelyam'	$\frac{2,8 *}{16,0 *}$	$\frac{2,8}{16,0}$	$\frac{3,5 *}{20,0 *}$	$\frac{3,0}{17,3}$	$\frac{0,3}{1,8}$	$\frac{13,3}{13,3}$
Красный Крест / 'Red Cross'	$\frac{3,1 *}{17,7 *}$	$\frac{1,1}{6,3}$	$\frac{3,3 *}{18,9 *}$	$\frac{2,5}{14,3}$	$\frac{-0,2}{-1,2}$	$\frac{48,7}{48,6}$
Среднее / Average	$\frac{3,0}{17,4}$	$\frac{3,6}{20,6}$	$\frac{3,5}{20,0}$	$\frac{3,4}{19,3}$	-	-
CV, %	$\frac{44,0}{44,1}$	$\frac{37,3}{37,4}$	$\frac{31,7}{31,4}$	$\frac{24,0}{23,9}$	-	-
HCP ₀₅ / LSD ₀₅	$\frac{0,40}{2,27}$	$\frac{0,44}{2,53}$	$\frac{0,42}{2,28}$	Ффакт < Фтеор	-	-

Примечания: в числителе – урожайность в кг с куста, в знаменателе – т с 1 га /
Notes: the numerator is the yield in kg per bush, the denominator is t from 1 ha

Высокую, но нестабильную по годам урожайность показал сорт Нива – 4,4 кг/куст (25,1 т/га). Хорошей продуктивностью и средней степенью изменчивости характеризуются сорта Ася, Подарок победителям. У большей части изучаемых сортов коэффициент вариации величины урожайности высокий, они сильнее реагируют на изменения гидротермических условий вегетационного периода.

В 2023 г. восьмилетние растения (посадка осенью 2015 г.) взятых на изучение сортов дали высокий урожай. Следовательно, данную плантацию смородины красной можно эксплуатировать и далее, что согласуется с литературными данными⁷.

Проведённые технологические исследования определяют сроки эксплуатации планта-

ций: для чёрной смородины – 6–8, для красной – до 8–10 лет.

По данным за три года, изучаемые сорта можно отнести к высокоурожайным (не менее 15 т/га), но с нестабильным плодоношением по годам, за исключением сортов Газель, Ася, Подарок победителям.

По данным Т. А. Голод⁸, в условиях Северо-Запада России урожайность пятилетних растений сортов смородины красной составила: Йонкер ван Тетс – 1,28 кг/куст, Натали – 2,9, Вика – 1,82, Ася – 1,58, Нива – 1,1 кг/куст. В более прохладных и влажных условиях Ленинградской области сорт Натали дал более высокий урожай по сравнению с сортом Йонкер ван Тетс, сорт Нива уступает ему по продуктивности.

⁷Перспективная ресурсосберегающая технология для ягодных кустарниковых насаждений: методические рекомендации. М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2009. 52 с.

⁸Голод Т. А. Указ. соч.

Заключение. У изучаемых в условиях Орловской области сортов смородины красной раннего и среднего сроков созревания из биоресурсной коллекции ВНИИСПК длина кисти значительно варьирует по годам в зависимости от метеорологических условий вегетационного периода. Более стабильным данный признак отмечен у сорта Вика, коэффициент вариации составил 20 %. У остальных сортов изменчивость признака варьировала от 20,4 % (Йонкер ван Тетс, Газель) до 35,6 % (Красная Кузьмина). В среднем за годы изучения длина кисти контрольного сорта Йонкер ван Тетс составила 8,6 см, и только сорт Красная Кузьмина имел существенные отличия от контроля.

Крупноплодность проявил сорт Нива, средняя масса ягоды за три года составила 0,76 г и существенно превысила контрольный сорт.

Остальные вошли в группу сортов со средней массой ягоды. Значения показателя «масса ягоды» очень сильно изменялись по годам, коэффициент вариации составил от 8,4 (Йонкер ван Тетс) до 31,7 (Нива). Выравненностью ягод в кисти характеризовались сорта Натали и Вика.

В среднем за три года высокую урожайность проявили сорта Красный крест – 14,3 т/га (CV = 48,7 %) и Газель – 25,6 т/га (CV = 10,7 %).

Высокой стабильной урожайностью и параметрами компонентов продуктивности выделились сорта Газель, Ася, Подарок победителям. Сорт Нива характеризовался крупноплодностью и высокой урожайностью, но меньшей стабильностью по годам. Сорт Красный крест в условиях Орловской области не реализовал свой генетический потенциал продуктивности.

Список литературы

1. Акимов М. Ю., Бессонов В. В., Коденцова В. М., Эллер К. И., Вржесинская О. А., Бекетова Н. А. и др. Биологическая ценность плодов и ягод российского производства. Вопросы питания. 2020;89(4):220–232. DOI: <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2020-10055> EDN: UOQLM
2. Макаркина М. А., Голяева О. Д. Биохимическая оценка ягод новых сортов смородины красной для дальнейшего их использования в селекции на улучшенный химический состав плодов. Садоводство и виноградарство. 2020;(2):28–33. DOI: <https://doi.org/10.31676/0235-2591-2020-2-28-33> EDN: TMNGGB
3. Milivojevic J., Slatnar A., Mikulic-Petkovsek M., Stampar F., Nikolic M., Veberic R. The influence of early yield on the accumulation of major taste and health-related compounds in black and red currant cultivars (*Ribes* spp.). Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2012;60(10):2682–2691. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf204627m>
4. Frum A., Cecilia G., Gligor F., Dobraea C., Ovidiu T. Identification and Quantification of Phenolic Compounds from Red Currant (*Ribes rubrum* L.) and Raspberries (*Rubus idaeus* L.). International Journal of Pharmacology Phytochemistry and Ethnomedicine. 2017;6:30–37. DOI: <https://doi.org/10.18052/www.scipress.com/IJPPE.6.30>
5. Сокерина Н. Н. Перспективные для Республики Коми сорта красной смородины. Плодоводство и ягодоводство России. 2016;47:299–307. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=xcrblf> EDN: XCRLBF
6. Атрошенко Г. П., Голод Т. А. Оценка сортов смородины красной для селекции и практики на Северо-Западе РФ. Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2019;(54):11–15. DOI: <https://doi.org/10.24411/2078-1318-2019-11011> EDN: AQNICH
7. Сазонов Ф. Ф., Кышлалы В. М. Оценка смородины красной по основным морфоструктурным компонентам продуктивности в условиях Брянской области. Агроэкологические аспекты устойчивого развития АПК: мат-лы XIV Международ. научн. конф. Кино: Брянский ГАУ, 2017. С. 401–405.
8. Родюкова О. С. Комплексная оценка интродуцированных сортов смородины красной в условиях Тамбовской области. Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2022;183(2):74–81. DOI: <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2022-2-74-81> EDN: BQRTUH
9. Джураева Ф. К., Иванова Е. А., Мурсалимова Г. Р. Потенциал продуктивности и биохимический состав красной смородины в условиях Оренбуржья. Плодоводство и ягодоводство России. 2014;39:71–75. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=scxxzn> EDN: SCXXZN
10. Чеботок Е. М. Сорта смородины красной челябинской селекции в условиях Среднего Урала и их антиоксидантные показатели. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2023;24(1):86–94. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.1.86-94> EDN: YIKECR
11. Сабарайкина С. М. Интродукционная оценка сортов красной смородины в условиях Центральной Якутии. Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки. 2017;(4(253)):87–92. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28913431> EDN: YISNMJ
12. Sepp T., Rätsep R., Libek A.-V., Kikas A. Evaluation of *Ribes Rubrum* Cultivars in Estonia. Proceedings of the Latvian Academy of Sciences. Section B: Natural Exact and Applied Sciences. 2022;76(4):448–454. DOI: <https://doi.org/10.2478/prolas-2022-0069>
13. Matejcek A., Kaplan J., Paprstein F., Matejickova J. Evaluation of red currant and white currant prospective cultivars. Acta Hort. 2016;1117:49–52. DOI: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1117.9>
14. Князев С. Д., Огольцова Т. П. Селекция черной смородины на современном этапе. Орел: Орловский ГАУ имени Н. В. Парахина, 2004. 238 с.
15. Соврикова Е. М. Оценка гибридных форм черной смородины Алтайской селекции. Актуальные проблемы садоводства России и пути их решения: мат-лы Всеросс. научн.-метод. конф. Орел: ВНИИСПК, 2007. С. 109–111.

16. Коробкова Т. С. Реализация потенциальной продуктивности смородины черной в условиях криолитозоны. Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2019;24(2):74–82. DOI: <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2019-24-2-7> EDN: AFKMIB

References

1. Akimov M. Yu., Bessonov V. V., Kodentsova V. M., Eller K. I., Vrzhesinskaya O. A., Beketova N. A. et al. Biological value of fruits and berries of Russian production. *Voprosy pitaniya* = Problems of Nutrition. 2020;89(4):220–232. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2020-10055>
2. Makarkina M. A., Golyaeva O. D. Biochemical evaluation of berries of new red currant varieties for their further use in breeding to improve chemical fruit composition. *Sadovodstvo i vinogradarstvo* = Horticulture and viticulture. 2020;(2):28–33. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31676/0235-2591-2020-2-28-33>
3. Milivojevic J., Slatnar A., Mikulic-Petkovsek M., Stampar F., Nikolic M., Veberic R. The influence of early yield on the accumulation of major taste and health-related compounds in black and red currant cultivars (*Ribes* spp.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2012;60(10):2682–2691. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf204627m>
4. Frum A., Cecilia G., Gligor F., Dobrea C., Ovidiu T. Identification and Quantification of Phenolic Compounds from Red Currant (*Ribes rubrum* L.) and Raspberries (*Rubus idaeus* L.). *International Journal of Pharmacology Phytochemistry and Ethnomedicine*. 2017;6:30–37. DOI: <https://doi.org/10.18052/www.scipress.com/IJPPE.6.30>
5. Sokerina H. H. Promising for the Republic of Komi varieties of red currant. *Plodovodstvo i yagodovodstvo Rossii* = Pomiculture and small fruits culture in Russia. 2016;47:299–307. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=xcrfbf>
6. Atroshchenko G. P., Golod T. A. Evaluation of red currant varieties for breeding and practice in the North-West of the Russian Federation. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Izvestiya Saint-Petersburg State Agrarian University. 2019;(54):11–15. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24411/2078-1318-2019-11011>
7. Sazonov F. F., Kyshlaly V. M. Evaluation of red currant on the main morphological components of productivity in the Bryansk region. *Agroecological aspects of sustainable agricultural development: Proceedings of the XIV International Scientific Conference*. Kokino: *Bryanskiy GAU*, 2017. C. 401–405.
8. Rodyukova O. S. Integrated assessment of introduced red currant cultivars under the conditions of Tambov Province. *Trudy po prikladnoy botanike, genetike i seleksii* = Proceedings on applied botany, genetics and breeding. 2022;183(2):74–81. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2022-2-74-81>
9. Dzhuraeva F. K., Ivanova E. A., Mursalimova G. R. Potential of productivity and biochemical composition of red currant in the conditions of Orenburg region. *Plodovodstvo i yagodovodstvo Rossii* = Pomiculture and small fruits culture in Russia. 2014;39:71–75. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=scxxzn>
10. Chebotok E. M. Varieties and antioxidant indices of red currant of Chelyabinsk breeding in the conditions of the Middle Urals. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2023;24(1):86–94. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.1.86-94>
11. Sabaraykina S. M. Adaptive potential of new varieties red currant under condition of Central Yakutia. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye nauki* = Scientific Bulletins of the Belgorod State University. Natural Sciences. 2017;(4(253)):87–92. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28913431>
12. Sepp T., Rätsep R., Libek A.-V., Kikas A. Evaluation of *Ribes Rubrum* Cultivars in Estonia. *Proceedings of the Latvian Academy of Sciences. Section B: Natural Exact and Applied Sciences*. 2022;76(4):448–454. DOI: <https://doi.org/10.2478/prolas-2022-0069>
13. Matejcek A., Kaplan J., Paprstein F., Matejckova J. Evaluation of red currant and white currant prospective cultivars. *Acta Hort.* 2016;1117:49–52. DOI: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1117.9>
14. Knyazev S. D., Ogoltsova T. P. Breeding of black currant at the present stage. Orel: *Orlovskiy GAU imeni N. V. Parakhina*, 2004. 238 p.
15. Sovrikova E. M. The estimation of black currant hybrid forms of Altai breeding. Actual problems of horticulture in Russia and ways to solve them: *Proceedings of the All-Russian Scientific and Methodological Conference*. Orel: *VNIISPK*, 2007. pp. 109–111.
16. Korobkova T. S. Realization of the potential productivity of black-currant under the conditions of cryolithozone. *Prirodnye resursy Arktiki i Subarktiki* = Arctic and Subarctic Natural Resources. 2019;24(2):74–82. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2019-24-2-7>

Сведения об авторе

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

Information about the author

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

✉ – Для контактов / Corresponding author

Элементы сортовой технологии возделывания нового сорта конопли посевной Людмила

© 2024. И. В. Бакулова✉, И. И. Плужникова, Н. В. Криушин

ФГБНУ «Федеральный научный центр лубяных культур», г. Тверь,
Российская Федерация

В 2023 году в Государственный реестр селекционных достижений РФ включен и допущен к использованию по Средне-Волжскому региону сорт однодомной безнаркотической конопли посевной Людмила. В связи с внедрением в производство и с целью размножения семян нового сорта в условиях Пензенской области в 2021–2023 гг. изучали широкорядный (с междурядьями 45 и 70 см) и рядовой (15 см) способы посева и нормы высева семян с учетом основных направлений использования культуры. При изучаемых способах посева и нормах высева урожайность стеблей в среднем за годы исследований достигала 11,3–14,4 т/га и была максимальной при рядовом посеве с нормой высева 3,0 млн всх. семян/га. Высокую урожайность семян получили при широкорядных посевах – 1,15 т/га (междурядья 70 см, норма высева 0,9 млн семян/га) и 1,04 т/га (45 см, 1,2 млн семян/га), при рядовом посеве при всех изучаемых нормах – 0,90–0,91 т/га. Повышение нормы высева от 2,0 до 3 млн всх. семян/га при рядовом посеве сопровождалось увеличением урожайности стеблей на 3,1 т/га (27,4 %), содержания волокна в стеблях с 30,9 до 31,8 % и его сбором с 3,91 до 5,54 т/га. При широкорядном посеве с междурядьями 70 см в стебле содержалось 26,5–28,7 % волокна с общим выходом 3,37–4,18 т/га, с междурядьями 45 см содержание волокна в стебле возросло до 29,8–30,4 %, что позволило собрать с 1 гектара 3,71–4,77 т волокна. Выявлены экономически эффективные способы посева и нормы высева семян конопли сорта Людмила, обеспечивающие рентабельность производства семян на уровне 129–147 %.

Ключевые слова: *Cannabis sativa* L., способ посева, норма высева, структура урожая, волокно

Благодарности: работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный научный центр лубяных культур» (тема № FGSS-2022-0008).

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Бакулова И. В., Плужникова И. И., Криушин Н. В. Элементы сортовой технологии возделывания нового сорта конопли посевной Людмила. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2024;25(3):388–394.

DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.3.388-394>

Поступила: 12.03.2024

Принята к публикации: 20.05.2024

Опубликована онлайн: 26.06.2024

Elements of varietal technology of cultivation of a new cannabis sativa variety 'Lyudmila'

© 2024. Irina V. Bakulova✉, Irina I. Pluzhnikova, Nikolay V. Kriushin

Federal Research Center for Bast Fiber Crops, Tver, Russian Federation

In 2023, the State Register of Breeding Achievements of the Russian Federation included and approved for use in the Middle Volga region a variety of monoecious drug-free cannabis sativa 'Lyudmila'. In connection with the introduction into production and for the purpose of propagating seeds of a new variety in the Penza region in 2021–2023, wide-row (with row spacing of 45 and 70 cm) and ordinary (15 cm) sowing methods and seed sowing rates were studied, taking into account the main directions of crop use. With the studied methods of sowing and seeding rates, the yield of stems on average over the years of research reached 11.3–14.4 t/ha and was maximum with ordinary sowing with a seeding rate of 3.0 million pcs/ha. On the contrary, higher seed yields were obtained with wide-row sowing – 1.15 t/ha (row spacing 70 cm, seeding rate 0.9 million pcs/ha) and 1.04 t/ha (45 cm, 1.2 million pcs/ha), with ordinary sowing for all studied – 0.90–0.91 t/ha. An increase in the seeding rate from 2.0 to 3 million pcs/ha during ordinary sowing was accompanied by an increase in the yield of stems by 3.1 t/ha (27.4 %), the fiber content in stems from 30.9 to 31.8 % and its collection from 3.91 to 5.54 t/ha. By wide-row sowing with row spacing of 70 cm, the stem contained 26.5–28.7 % fiber with a total yield of 3.37–4.18 t/ha, by sowing with row spacing of 45 cm, the fiber content in the stem increased to 29.8–30.4 %, which made it possible to harvest 3.71–4.77 tons of fiber per 1 hectare. Economically effective methods of sowing and seeding rates of 'Lyudmila' cannabis variety have been identified, ensuring the profitability of seed production at the level of 129–147 %.

Keywords: *Cannabis sativa* L., method of sowing, seeding rate, crop structure, fiber

Acknowledgements: the research was carried out under the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of the Federal Research Center for Bast Fiber Crops (theme No. FGSS-2022-0008).

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

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

For citations: Bakulova I. V., Pluzhnikova I. I., Kriushin N. V. Elements of varietal technology of cultivation of a new cannabis sativa variety Lyudmila. *Agrarnaya nauka Euro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2024;25(3):388–394. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.3.388-394>

Received: 12.03.2024

Accepted for publication: 20.05.2024

Published online: 26.06.2024

Важным условием эффективного развития любой отрасли экономики является устойчивость производства и в сельском хозяйстве этот фактор имеет значительную роль [1]. При возделывании сельскохозяйственных культур требуется, чтобы колебания уровня урожайности были как можно меньше, в этой связи исключительное значение для реализации потенциала продуктивности принадлежит сортам и технологиям [2, 3]. Основные требования, предъявляемые к сортам – это высокая урожайность с улучшенными характеристиками качества и значительная рентабельность культуры, поэтому новый сорт может получить распространение в производстве при условии получения высоких и стабильных урожаев [4]. Несмотря на значимость сорта, стабильно высокую его продуктивность и качество получаемой продукции могут в полной мере обеспечить приёмы сортовой технологии, направленные на эффективное управление продуктивностью культуры в конкретных почвенно-климатических условиях района возделывания [5]. При разработке агротехники для каждого сорта важно учитывать специфику «критических» периодов онтогенеза, а также фазы наибольшей отзывчивости на регулируемые факторы внешней среды [6]. В связи с этим проблема стабилизации и повышения урожайности, качества продукции путём более точного применения элементов технологии возделывания является весьма актуальной и представляет не только научную, но и практическую значимость [7, 8, 9].

Конопля посевная (*Cannabis sativa* L.) – это растение неприхотливое, редко страдает от изменения погодных условий и болезней, после её посева происходит значительное оздоровление почвенной микрофлоры, снижается количество сорных растений и необходимость применения гербицидов. Она обладает отличными свойствами фиторемедиации, под которой понимается способность растения удалять нежелательные и вредные загрязнители из воздуха, почвы и воды [10, 11]. Единственное, что необходимо для внедрения нового и перспективного сорта конопли — это научные наработки по агротехнике возделывания культуры в конкретных почвенно-климатических условиях. Урожай

семян, волокна конопли и их качество в значительной степени зависят от способов посева и норм высева семян, поэтому для нового сорта конопли изучение комплексного воздействия технологических приёмов актуально [12].

Цель исследований – экспериментальное обоснование способов посева и норм высева для оптимизации продукционного процесса и увеличения урожайности нового сорта конопли посевной Людмила в условиях Пензенской области (лесостепь Среднего Поволжья).

Задачи исследований – установить оптимальные нормы высева и способы сева нового сорта посевной конопли Людмила при её репродукции и выявить влияние изучаемых факторов на формирование урожайности и качества коноплепродукции.

Научная новизна – в условиях лесостепи Среднего Поволжья изучено влияние нормы высева и способов посева на формирование продуктивности нового безнаркотического сорта конопли посевной Людмила для различных направлений использования.

Материал и методы. С целью подбора оптимальных способов посева в сочетании с нормами высева для различных направлений использования продукции коноплеводства сорт выращивали в полевых мелкоделяночных опытах с последовательным расположением делянок. Объект исследований – новый среднеспелый сорт конопли посевной среднерусского экотипа Людмила зеленцового направления использования. Продукция нового сорта конопли посевной Людмила соответствует большинству технологических требований, предъявляемых к растительному сырью (пенькоматериалу), получаемому из этой прядильной культуры [13].

Почва опытного участка – чернозём выщелоченный среднесуглинистый с содержанием гумуса по Тюрину 4,6–5,9 % (ГОСТ 26213-91¹), гидролизующего азота 136–140 мг/кг (методом Корнфилда), подвижного фосфора 172–200 мг/кг, обменного калия 160–230 мг/кг почвы (ГОСТ 26204-91²), $S_{\text{осн.}}$ – 29,3–33,5 мг-экв. на 100 г почвы (ГОСТ 27821-88)³, pH 5,0–5,1 (ГОСТ 26483-85⁴). Повторность опыта трёхкратная, площадь делянки – 20 м².

¹ГОСТ 26213-91. Почвы. Методы определения органического вещества. М.: изд-во стандартов, 1992. 8 с.

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

²ГОСТ 26204-91. Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Чирикова в модификации ЦИНАО. М.: изд-во стандартов, 1992. 8 с. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/2e0/4294828276.pdf>

³ГОСТ 27821-88. Почвы. Определение суммы поглощенных оснований по методу Каппена. М.: изд-во стандартов, 1988. 7 с. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/3a6/4294826916.pdf>

⁴ГОСТ 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>

В производственных условиях, в зависимости от потребности в коноплепродукции, использование сортов может быть двусторонним (на волокно и семена), волокнистым (уборка на зеленец), семенным (семеноводческие посевы высоких репродукций конопли). В первом случае коноплю сеют широкорядным способом с шириной междурядий 45 см и нормой высева 0,8–1,5 млн всхожих семян на гектар, во втором – обычным рядовым (15 см) с нормой высева от 2,0 до 5,0 млн всхожих семян на гектар, в третьем – с шириной междурядий 70 см и нормой высева 0,5–0,9 млн семян/га. Способы посева и нормы высева для нового сорта конопли ещё не разработаны, вследствие этого изучали различные приемы посева:

1) широкорядный посев с шириной междурядий 70 см и нормами высева 0,5; 0,7; 0,9 млн всхожих семян/га, что составляет 9, 12 и 16 кг/га соответственно;

2) широкорядный посев с шириной междурядий 45 см и нормами высева 0,8; 1,0; 1,2 млн всхожих семян/га, что соответствует весовой норме 15, 18 и 22 кг/га;

3) рядовой посев с междурядьями 15 см и нормами высева 2,0; 2,5; 3,0 млн всхожих семян/га, что составляет в весовом выражении 36, 45, 54 кг/га.

Посев выполняли селекционной сеялкой СН-16 с перекрытием задвижками высевающих секций для широкорядных посевов в 2021 г. 6 мая, в 2022 г. – 29 апреля, в 2023 г. – 30 апреля. Уборку и учёт проводили путём ручного скашивания стеблестоя и обмолота уборочных снопов после их сушки на стационаре, урожай семян и стеблей приводили к стандартной влажности. Исследования выполняли при общем высоком уровне технологии в соответствии с методическими указаниями по проведению полевых и вегетационных опытов с коноплей⁵. Для математической обработки экспериментальных данных использовали метод дисперсионного анализа по Б. А. Доспехову⁶.

Погодные условия в годы проведения исследований (2021–2023 гг.) были неодинаковыми. В 2021 году температура воздуха и количество осадков были выше климатической нормы на 3,0–3,3 °С и 34,8 мм и составили за

вегетационный период 2528,4 °С при 201,7 мм, ГТК⁷ = 0,92. В 2022 году условия для вегетативного развития сложились благоприятными – температура воздуха была на уровне средне-многолетних значений на фоне достаточного количества осадков. За период «посев – цветение» гидротермический коэффициент изменялся от 1,10 до 2,43, при переходе к генеративной стадии развития установилась сухая и жаркая погода (24...34 °С) на фоне полного отсутствия осадков, что способствовало успешному созреванию семян. В целом за вегетацию сумма активных температур составила 2346,8 °С при 188,0 мм осадков, вегетационный период характеризовался как недостаточно увлажнённый (ГТК = 0,8).

Условия периода весенней вегетации 2023 года отличались прохладной погодой с малым количеством осадков. В фазу активного роста конопли осадков выпало 85,6 % от нормы при температуре воздуха 19,7 °С. Начало созревания семян характеризовалось благоприятными для роста и развития растений конопли погодными условиями, что обусловило значительный прирост показателей хозяйственно полезных признаков у культуры. В целом за вегетационный период сумма активных температур составила 2104 °С при 186 мм осадков.

Результаты и их обсуждение. У нового сорта конопли урожайность семян, стеблей, волокна и их качество в значительной степени определялись климатическими условиями и приёмами возделывания.

При изучаемых способах посева и нормах высева урожайность стеблей в среднем за годы исследований составила 11,3–14,4 т/га и была выше при рядовом посеве (табл. 1). Увеличение нормы высева от 2,0 до 3 млн всх. семян/га способствовало росту урожайности стеблей на 3,1 т/га, или 27,4 %. При широко-рядных посевах с междурядьями 70 и 45 см разница в урожайности стеблей тесно связана с густотой стояния растений, чем ниже норма высева, тем меньше выпадает растений, вследствие чего различия между вариантами с низкими и высокими нормами высева к моменту уборки минимальны.

⁵Методические указания по проведению полевых и вегетационных опытов с коноплей. сост. Г. Р. Бедак и др. М.: ВАСХНИЛ. 1980. 34 с.

⁶Доспехов Б. А. Методика полевого опыта: с основами статистической обработки результатов исследований. М.: Альянс, 2014. 349 с.

⁷Гидротермический коэффициент Селянинова. Метеорологический Словарь. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.agrometeo.online> (Дата обращения: 02. 02. 2024).

Таблица 1 – Урожайность конопли посевной сорта Людмила при разных способах посева и нормах высева, т/га (2021–2023 гг.) /

Table 1 – The yield of ‘Lyudmila’ cannabis variety with different methods of sowing and seeding rates, t/ha (2021–2023)

Способ посева / Method of sowing	Норма высева, млн семян/га / Seeding rate, million pcs/ha	Урожайность стеблей / Yield of stems				Урожайность семян / Seed yield			
		2021 г.	2022 г.	2023 г.	среднее / average	2021 г.	2022 г.	2023 г.	среднее / average
Широкорядный (70 см) / Wide - row (70 cm)	0,5	11,7	12,4	13,1	12,4	1,28	0,99	0,88	1,05
	0,7	13,1	9,81	15,4	12,8	1,49	0,75	0,98	1,07
	0,9	12,5	7,88	18,0	12,8	1,28	0,76	1,40	1,15
HCP ₀₅ / LSD ₀₅		0,30	0,46	2,10	NS	NS*	0,035	0,22	0,091
Широкорядный (45 см) / Wide - row (45 cm)	0,8	10,4	12,3	15,1	12,6	0,97	0,94	0,87	0,93
	1,0	11,4	10,7	14,2	12,1	0,98	0,92	1,04	0,98
	1,2	12,7	8,97	19,6	13,8	1,05	0,84	1,24	1,04
HCP ₀₅ / LSD ₀₅		1,18	0,37	4,22	1,18	0,02	0,06	0,27	0,09
Рядовой (15 см) / Ordinary (15 cm)	2,0	12,9	10,5	10,5	11,3	0,87	1,00	0,85	0,91
	2,5	14,7	12,3	12,2	13,1	0,94	0,94	0,85	0,91
	3,0	16,2	11,6	15,4	14,4	1,00	0,73	0,96	0,90
HCP ₀₅ / LSD ₀₅		0,50	NS	0,94	0,63	NS	0,07	0,13	NS

*NS – нет существенных различий по вариантам / NS – there are no significant differences among the variants

При ширококрядных посевах с меньшими нормами высева, благодаря большей площади питания и высокой агротехнике, урожайность семян по сравнению с рядовым посевом повышалась на 8,2 % (ширина междурядий 45 см) и 17,4 % (ширина междурядий 70 см). Наиболее высокий урожай семян (1,15 т/га) получили при ширококрядном способе посева с междурядьями 70 см и нормой высева 0,9 млн семян/га, по мере снижения нормы высева до 0,5 млн семян/га урожай семян уменьшался незначительно – до 1,05 т/га. При посеве с междурядьями 45 см наиболее высокий урожай семян (1,04 т/га) получили в варианте с нормой высева 1,2 млн семян/га. При рядовом посеве при всех изучаемых нормах высева получили близкий результат по урожайности семян (0,90-0,91 т/га).

Технологические приёмы возделывания влияли на строение стебля и содержание в нём волокна. Из данных таблицы 2 видно, что несмотря на неодинаковые условия роста и развития растений при разных способах посева морфологические показатели признаков стебля отличаются мало. Меньше всего изменяется общая и техническая длина стебля, коэффициент вариации в зависимости от изучаемых факторов – 0,93–2,70 % (высота растений) и 1,36–2,49 % (тех. длина стебля). Существенная разница проявляется лишь по длине соцветия, коэффициент вариации признака в основном колеблется в пределах средней степени – от 8,1–12,6 % при ширококрядных посевах до 18,2 % при рядовом. Мыклость стебля зависела

от изменения технической длины и диаметра стебля, в целом по вариантам показатель составил 207–267 единиц с максимальными значениями при рядовом посеве.

При ширококрядных посевах получили самые высокие и продуктивные растения – в среднем независимо от изменения нормы высева высота растений достигала 280,0–294,7 см, техническая длина стебля 221,2–229,9 см, длина соцветия 58,7–65,0 см, диаметр стебля 0,96–1,06 см, при рядовом посеве – 257 см, 207,2, 0,78, 50,1 см соответственно.

Конопля – культура лубяная, поэтому выращивается главным образом с целью получения волокна. Из данных таблицы 3 видно, что с уменьшением нормы высева семян на 1 га понижается содержание волокна в стеблях. При ширококрядных и рядовых посевах выход волокна снижался с уменьшением нормы высева. Повышение нормы высева при рядовом посеве до 3,0 млн семян на 1 га сопровождалось увеличением содержания волокна в стеблях до 31,8 % и общего сбора волокна с 1 гектара до 5,54 т. Увеличение нормы высева семян при ширококрядных посевах не вызывало значительного изменения содержания волокна в стеблях растений, однако общий урожай существенно повышался. Выявлена зависимость содержания общего волокна от диаметра стебля ($r = -0,79$) и его технической длины ($r = -0,80$), другими словами, чем тоньше стебель и меньше диаметр (7–8 мм), тем больше в нём содержится волокна.

Таблица 2 – Хозяйственно полезные признаки конопли посевной сорта Людмила в зависимости от приёмов возделывания (2021–2023 гг.) /

Table 2 – Economic traits of ‘Lyudmila’ cannabis variety depending on the cultivation methods (2021–2023)

Способ посева / Method of sowing	Норма высева, млн семян/га / Seeding rate, million pcs/ha	Высота растений, см / Height of plants, cm	Техническая длина стебля, см / Technical length of the stem, cm	Диаметр стебля, см / Diameter of the stem r, cm	Длина соцветия, см / The length of the inflo- rescence, cm	Масса 1000 семян, г / Weight of 1000 seeds, g
Широкорядный (70 см) / Wide - row (70 cm)	0,8	284,7	217,7	1,05	67,0	16,9
	1,0	281,3	225,0	0,92	56,0	16,3
	1,2	274,0	221,0	0,92	53,0	16,5
HCP ₀₅ / LSD ₀₅		NS	NS	0,08	6,28	NS
Широкорядный (45 см) / Wide - row (45 cm)	0,5	293,0	223,7	1,01	69,7	17,1
	0,7	294,5	235,0	1,01	59,3	17,0
	0,9	296,7	231,0	1,00	66,0	17,0
HCP ₀₅ / LSD ₀₅		NS	7,85	NS	5,46	NS
Рядовой (15 см) / Ordinary (15 cm)	2,0	265,0	204,0	0,77	60,3	16,1
	2,5	252,0	208,3	0,78	42,7	16,2
	3,0	254,0	209,3	0,79	47,4	16,1
HCP ₀₅ / LSD ₀₅		4,52	NS	NS	9,38	NS

Таблица 3 – Содержание общего и длинного волокна в стеблях конопли сорта Людмила при разных способах посева (2021–2023 гг.) /

Table 3 – The content of total and long fiber in the stems of ‘Lyudmila’ cannabis variety by different methods of sowing (2021–2023)

Способ посева / Method of sowing	Норма высева, млн семян/га / Seeding rate, million pcs/ha	Содержание общего волокна, % / Total fiber content, %				Урожайность волокна, т/га / Fiber productivity, t/ha			
		2021 г.	2022 г.	2023 г.	среднее / average	2021 г.	2022 г.	2023 г.	среднее / average
Широкорядный (70 см) / Wide - row (70 cm)	0,5	26,0	26,4	27,2	26,5	3,04	3,52	3,56	3,37
	0,7	29,1	28,5	28,4	28,7	3,81	4,29	4,37	4,16
	0,9	26,6	27,2	28,8	27,5	3,33	4,04	5,18	4,18
HCP ₀₅ / LSD ₀₅		0,54	0,32	NS	-	0,335	0,326	1,192	-
Широкорядный (45 см) / Wide - row (45 cm)	0,8	29,6	30,3	29,6	29,8	3,18	3,48	4,47	3,71
	1,0	29,4	30,4	30,1	30,0	3,24	4,34	4,27	3,95
	1,2	30,2	30,9	30,0	30,4	3,84	4,60	5,88	4,77
HCP ₀₅ / LSD ₀₅		1,41	NS	NS	-	0,315	0,218	0,431	-
Рядовой (15 см) / Ordinary (15 cm)	2,0	31,5	31,7	29,5	30,9	3,92	4,80	3,01	3,91
	2,5	33,3	31,1	31,3	31,9	4,67	5,50	3,82	4,66
	3,0	33,9	30,8	30,7	31,8	5,20	6,70	4,73	5,54
HCP ₀₅ / LSD ₀₅		1,21	0,45	0,26	-	0,198	0,14	0,51	-

Установлено, что при широкорядном посеве с междурядьями 70 см нормами высева 0,5–0,9 млн семян/га в стебле содержится до 26,5–28,7 % волокна, а общий выход составляет 3,37–4,18 т/га, при посеве с шириной междурядий 45 см и нормами высева 0,8–1,2 млн семян/га содержание волокна в стебле повышается до 29,8–30,4 %, что даёт возможность собрать с 1 гектара до 3,71–4,77 т волокна. Рядовой способ посева с нормами высева 2,0–

3,0 млн семян/га в сравнении с широкорядными обеспечивает повышение содержания волокна в стебле до 30,9–31,9 % и урожая всего волокна до 3,91–5,54 т/га.

Расчёты экономической эффективности показали, что в среднем за период исследований затраты при широкорядном способе посева составили от 67,4 до 69,8 тыс. руб/га в варианте с междурядьями 70 см, от 69,45 до 71,9 тыс. руб/га – с междурядьями 45 см и от 59,6 до 62,3 тыс. руб/га –

при рядовом способе посева и изменялись в зависимости от расхода семенного материала и уходовых мероприятий. Установлено, что экономически выгодно сеять коноплю сорта Людмила на семенные цели с шириной междурядий 70 см и нормой высева 0,9 млн семян/га, при этом условно чистый доход составил 102,7 тыс. руб/га, рентабельность 147,1 %. При возделывании с шириной междурядий 45 см урожайность (1,04 т/га) и высокий уровень рентабельности (117 %) получили при посеве с нормой высева семян 1,2 млн/га. При обычном рядовом посеве с нормой высева 2,0 млн/га уровень рентабельности составил 129 %, при увеличении нормы высева до 3,0 млн всх. семян/га уровень рентабельности снизился до 116,7 %.

Заключение. Обобщая полученные результаты, можно сделать вывод, что максимальную

реализацию сортового потенциала нового сорта конопли посевной Людмила в условиях Пензенской области обеспечивает агротехника, включающая оптимальные научно обоснованные способы посева и нормы высева. Для получения высокого урожая семян однодомной конопли посевной сорта Людмила с целью репродуцирования необходимо посев осуществлять с шириной междурядий 70 см и нормой высева 0,9 млн всхожих семян на 1 га. На двустороннее использование с целью получения семян и волокна рекомендуется посев проводить с междурядьями 45 см и нормой высева 1,2 млн. всх. семян/га или рядовым способом с нормой высева 2 млн всх. семян/га. Для получения волокна при рядовом способе использовать норму высева 3 млн. всх. семян/га.

Список литературы

1. Губачёв В. А. Экологические аспекты устойчивости развития сельскохозяйственного производства региона. Развитие экономики и менеджмента в современном мире: сб. научн. тр. по итогам Междунар. научн.-практ. конф. Воронеж: изд-во Инновационный центр развития образования и науки, 2016. С. 49–54. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28426143> EDN: XYBHBX
2. Коновалов Ю. Б., Сулейман А. А., Скорняков Н. Н. Оценка стабильности урожайности и формирующих её показателей сортов яровой пшеницы в условиях Центрального региона. Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 2005;(2):29–40.
3. Жарких О. А., Дмитриевская И. И., Белопухов С. Л. Усовершенствование технологии выращивания технической конопли с использованием новых биорегуляторов. Роль аграрной науки в развитии лесного и сельского хозяйства Дальнего Востока: мат-лы III Национальной научн.-практ. конф. Уссурийск: Приморская государственная сельскохозяйственная академия, 2019. Часть 1. С. 66–70. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=jceuzk> EDN: JCEUZZK
4. Пономарёва М. Л., Пономарев С. Н., Маннапова Г. С. Создание новых сортов озимой ржи для Среднего Поволжья. Зерновое хозяйство России. 2015;(3):14–18. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23687484> EDN: TYJEOT
5. Жученко А. А., Трухачев В. И., Пенчуков В. М., Сотченко В. С., Агеев В. В., Ангилеев О. Г. и др. Системы земледелия Ставрополья. Ставрополь: АГРУС, 2011. 844 с.
6. Волкова И. И. Генная инженерия, селекция и семеноводство как инновационная деятельность в аграрном секторе России: проблемы и перспективы развития. Инновации в территориальном развитии: мат-лы XXXVI Ежегод. сессии экон.-геогр. секции Междунар. академии регион. развития и сотрудничества (МАРС). М.: Изд-во ИП Матушкина И. И., 2020. С. 87–97. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44325068> EDN: WRZPOG
7. Рыжов И. А. Значение технологии возделывания сельскохозяйственных культур в повышении эффективности растениеводства. Биология в сельском хозяйстве. 2016;(3(12)):14–17. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=xayfbv> EDN: XAYFBV
8. Плотников А. М., Гладков Д. В., Субботин И. А. Урожайность семян конопли при применении минеральных удобрений и гербицидов. Международный научно-исследовательский журнал. 2018;(3(69)):64–67. DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.69.022> EDN: YTGJME
9. Casillas A. Propagation of Cannabis sativa for commercial production. Materials of the annual meeting of the International Society of Plant Breeders. Acta Horticulturae 2016;1174(29):157–158. DOI: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1174.29>
10. Дубровин М. С. Применение технической конопли в производстве широкого спектра продукции различного назначения. International Agricultural Journal. 2022;65(2):30. DOI: https://doi.org/10.55186/25876740_2022_6_2_30 EDN: HYTPREK
11. Рыбалкин П. Н., Васюков П. П., Нимченко П. В., Сухорада Т. И., Кенийз В. В., Шоков Н. Р. и др. Рекомендации по возделыванию южной конопли в Краснодарском крае. Краснодар: изд-во ООО «Просвещение-Юг», 2020. 20 с.
12. Золкин А. Л., Матвиенко Е. В. Инновационные технологии в селекции и семеноводстве для создания новых сортов сельскохозяйственных растений с высокими хозяйственно ценными признаками. М.: РУСАЙИС, 2024. 130 с. Режим доступа: <https://glavkniga.ru/book/729484>
13. Серков В. А. Новый сорт конопли посевной Людмила. Международный сельскохозяйственный журнал. 2023;(4(394)):384–388. DOI: https://doi.org/10.55186/25876740_2023_66_4_384 EDN: WGAIVK

References

1. Gubachev V. A. Environmental aspects of the sustainability of agricultural production in the region. The development of economics and management in the modern world: Collection of scientific articles based on the results of the International scientific and practical Conference. Voronezh: *izd-vo Innovatsionnyy tsentr razvitiya obrazovaniya i nauki*, 2016. pp. 49–54. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28426143>
2. Kononov Yu. B., Suleyman A. A., Skornyakov N. N. Estimation of crop capacity stability of spring wheat varieties under central region conditions, its indices formed. *Izvestiya Timiryazevskoy sel'skokhozyaystvennoy akademii* = *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2005;(2):29–40. (In Russ.).
3. Zharkikh O. A., Dmitrievskaya I. I., Belopukhov S. L. Improvement of the technology of growing technical cannabis using new bioregulators. The role of agricultural science in the development of forestry and agriculture in the Far East: Proceedings of the III National Scientific and Practical Conference. Ussuriysk: *Primorskaya gosudarstvennaya sel'skokhozyaystvennaya akademiya*, 2019. Part 1. pp. 66–70. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=jceuzk>
4. Ponomareva M. L., Ponomarev S. N., Mannapova G. S. Breeding of new varieties of winter rye for middle povolzhie (on the example of the variety 'tantan'). *Zernovoe khozyaystvo Rossii* = *Grain Economy of Russia*. 2015;(3):14–18. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23687484>
5. Zhuchenko A. A., Trukhachev V. I., Penchukov V. M., Savchenko V. S., Ageev V. V., Angileev O. G., et al. Systems of agriculture of the Stavropol territory. Stavropol: *AGRUS*, 2011. 844 p.
6. Volkova I. I. Genetic engineering, breeding and seed production as innovation in the agricultural sector of Russia: problems and prospects for development. *Innovations in Territorial Development: Proceedings of the XXXVI annual session of the economic and geographic section of the International Academy of Regional Development and Cooperation*. Moscow: *Izd-vo IP Matushkina I. I.*, 2020. pp. 87–97. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44325068>
7. Ryzhov I. A. Value of technology of cultivation of crops in increase in efficiency of crop production. *Biologiya v sel'skom khozyaystve* = *Biology in agriculture*. 2016;(3(12)):14–17. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=xayfbv>
8. Plotnikov A. M., Gladkov D. V., Subbotin I. A. Hemp seeds yield in application of mineral fertilizers and herbicides. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* = *International Research Journal*. 2018;(3(69)):64–67. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.69.022>
9. Casillas A. Propagation of Cannabis sativa for commercial production. Materials of the annual meeting of the International Society of Plant Breeders. *Acta Horticulturae* 2016;1174(29):157–158. DOI: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1174.29>
10. Dubrovin M. S. Application of technical hemp in the production of light industry. *International Agricultural Journal*. 2022;65(2):30. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.55186/25876740_2022_6_2_30
11. Rybalkin P. N., Vasyukov P. P., Nimchenko P. V., Sukhorada T. I., Keniyz V. V., Shokov N. R. et al. Recommendations for the cultivation of southern cannabis in the Krasnodar Territory. Krasnodar: *izd-vo OOO «Prosveshchenie-Yug»*, 2020. 20 p.
12. Zolkin A. L., Matvienko E. V. Innovative technologies in breeding and seed production for the creation of new varieties of agricultural plants with highly valued economic traits. Moscow: *RUSAYIS*, 2024. 130 p. URL: <https://glavkniga.ru/book/729484>
13. Serkov V. A. New hemp variety Lyudmila. *Mezhdunarodnyy sel'skokhozyaystvennyy zhurnal* = *International Agricultural Journal*. 2023;(4(394)):384–388. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.55186/25876740_2023_66_4_384

Сведения об авторах

✉ **Бакулова Ирина Владимировна**, кандидат с.-х. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории агротехнологий, ФГБНУ «Федеральный научный центр лубяных культур», Комсомольский пр-т, д. 17/56, Тверь, 170041, Российская Федерация, e-mail: info@fncl.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8504-1001>, e-mail: i.bakulova.pnz@fncl.ru

Плужникова Ирина Ивановна, кандидат с.-х. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории агротехнологий, ФГБНУ «Федеральный научный центр лубяных культур», Комсомольский пр-т, д. 17/56, Тверь, 170041, Российская Федерация, e-mail: info@fncl.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9161-4803>

Кришнин Николай Викторович, кандидат с.-х. наук, старший научный сотрудник лаборатории агротехнологий, ФГБНУ «Федеральный научный центр лубяных культур», Комсомольский пр-т, д. 17/56, Тверь, 170041, Российская Федерация, e-mail: info@fncl.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6597-2543>

Information about the authors

✉ **Irina V. Bakulova**, PhD in Agricultural Science, leading researcher, the Laboratory of Agricultural Technologies, Federal Research Center for Bast Fiber Crops, 17/56 Komsomolskiy Prospekt, Tver, 170041, Russian Federation, e-mail: info@fncl.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8504-1001>, e-mail: i.bakulova.pnz@fncl.ru

Irina I. Pluzhnikova, PhD in Agricultural Science, leading researcher, the Laboratory of Agricultural Technologies, Federal Research Center for Bast Fiber Crops, 17/56 Komsomolskiy Prospekt, Tver, 170041, Russian Federation, e-mail: info@fncl.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9161-4803>

Nikolay V. Kriushin, PhD in Agricultural Science, senior researcher, the Laboratory of Agricultural Technologies, Federal Research Center for Bast Fiber Crops, 17/56 Komsomolskiy Prospekt, Tver, 170041, Russian Federation, e-mail: info@fncl.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6597-2543>

✉ – Для контактов / Corresponding author

<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.3.395-406>
УДК 635.21:632.937.3



Перспективы применения различных видов и штаммов симбиотических бактерий (*Xenorhabdus* sp.) в биологической защите картофеля от болезней в условиях Европейского Севера России

© 2024. З. П. Котова¹✉, Т. А. Данилова¹, Л. Г. Данилов², М. В. Архипов¹

¹Северо-Западный Центр междисциплинарных исследований проблем продовольственного обеспечения – обособленное структурное подразделение ФГБУН «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

²ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений», г. Пушкин, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Разработка экологически безопасных систем защиты растений от грибных патогенов с использованием симбиотических бактерий *Xenorhabdus* sp. – симбионтов энтомопатогенных нематод (ЭПН) в последние годы является новым направлением в сельскохозяйственной практике и несомненно представляет актуальность и научную значимость. В исследованиях использовали суспензии живых и автоклавированных культур симбиотических бактерий-симбионтов различных видов ЭПН (*Steinernema carpocapsae*, *S. feltiae* и *S. feltiae protense*) с титром бактериальных клеток 10^7 КОЕ/мл в сравнении с биологическим препаратом Фитоспорин-М (наста) и водой в качестве контроля. В лабораторных условиях при температуре 25 °С нами установлены различия в антибиотической активности первичных форм продуцентов *Xenorhabdus* sp., выделенных из различных видов ЭПН. Наибольшее ингибирование зоны роста гриба на 4-й день отмечено у метаболитов штамма *S. carpocapsae* в отношении *Alternaria solani*. Биологическая эффективность в подавлении этого патогена составила 51 %. Полевые исследования 2022-2023 гг. в условиях Республики Карелия на среднераннем сорте картофеля Ред Скарлетт, показали, что при эпифитотии (низкие температуры воздуха и избыточное переувлажнение) двукратное опрыскивание вегетирующих растений суспензией живых и автоклавированных культур симбиотических бактерий (ЭПН-1-1, ЭПН-2 и ЭПН-2-1) снижали развитие ризоктониоза по сравнению с контрольным вариантом на 50, 64 и 60 % соответственно. Установлено, что двукратная обработка живой и автоклавированной водной суспензией бактерий-симбионтов подвида *S. feltiae* была более эффективна и обеспечивала уменьшение степени развития симптомов парши обыкновенной в 1,3–2,8 раза и распространение ризоктониоза в 1,5–2,0 раза. Выявлено также, что двукратное опрыскивание растений во время вегетации живой и автоклавированной суспензией симбиотических бактерий *S. feltiae* достоверно увеличивает урожайность клубней на 35–22 % соответственно. Таким образом, использование биологически активных вторичных метаболитов *Xenorhabdus* sp. в качестве биологических средств защиты растений от возбудителей заболеваний на картофеле имеет значительный потенциал.

Ключевые слова: *Xenorhabdus bovienii* энтопатогенные нематоды, картофель, *Streptomyces scabies* (Thaxter) Waksman & Henrici), *Rhizoctonia solani* J. G. Kuhn, *Phytophthora infestans* (Montagne) de Bary, *Phoma exigua* var. *exigua*

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 24-26-20029), <https://grant.rscf.ru/site/user/bids?role=master>

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Котова З. П., Данилова Т. А., Данилов Л. Г., Архипов М. В. Перспективы применения различных видов и штаммов симбиотических бактерий (*Xenorhabdus* sp.) в биологической защите картофеля от болезней в условиях Европейского Севера России. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2024;25(3):395–406.

DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.3.395-406>

Поступила: 29.02.2024

Принята к публикации: 23.05.2024

Опубликована онлайн: 26.06.2024

Prospects for the use of various species and strains of symbiotic bacteria (*Xenorhabdus* sp.) in the biological protection of potatoes from diseases in the European North of Russia

© 2024. Zinaida P. Kotova¹✉, Tatyana A. Danilova¹, Leonid G. Danilov², Mikhail V. Arkhipov¹

¹North-West Centre of Interdisciplinary Researches of Problems of Food Maintenance, Saint-Petersburg, Russian Federation,

²All-Russian Research Institute for Plant Protection, Pushkin, Saint-Petersburg, Russian Federation

Research on the development of environmentally friendly plant protection systems against fungal pathogens using symbiotic bacteria *Xenorhabdus* sp. – symbionts of entomopathogenic nematodes (EPN) has been a new direction in agricultural practice in recent years and undoubtedly represent relevance and scientific significance. The studies used suspensions of live and autoclaved cultures of symbiotic bacteria of symbionts of various types of EPN (*Steinernema carpocapsae*, *S. feltiae* and *S. feltiae protense*) with a bacterial cell titer of 10^7 CFU/ml in comparison with the biological preparation *Phytopsporin-M* (dough) and water as a control. In laboratory conditions at a temperature of 25 °C, there were established differences in the antibiotic activity of the primary forms of producers of *Xenorhabdus* sp., isolated from different types of EPN. The greatest inhibition of the fungal growth zone on the 4th day was observed for metabolites of the *S. carpocapsae* strain against *Alternaria solani*. Biological effectiveness in suppressing this pathogen was 51 %. Field research conducted in 2022–2023 in the conditions of the Republic of Karelia on the mid-early potato variety ‘Red Scarlett’, showed that under epiphytotic conditions (low air temperatures and excessive waterlogging) double spraying of vegetative plants with a suspension of live and autoclaved cultures of symbiotic bacteria (EPN-1-1, EPN-2 and EPN-2 -1) reduced the development of rhizoctoniosis compared to the control variant by 50, 64 and 60 %, respectively. It was found that double treatment with a live and autoclaved aqueous suspension of bacteria, symbionts of the subspecies *S. feltiae* was more effective and ensured a reduction in the degree of development of scab symptoms by 1.3–2.8 times and the spread of rhizoctonia by 1.5–2.0 times. It has been also established that 2-fold spraying of plants with a live and autoclaved suspension of symbiotic bacteria *S. feltiae* during the growing season significantly increases the yield of tubers by 35–22 %, respectively. Thus, the use of biologically active secondary metabolites of *Xenorhabdus* sp. has significant potential as biological plant protection agents against potato pathogens.

Keywords: *Xenorhabdus bovienii* entomopathogenic nematodes, potato, *Streptomyces scabies* (Thaxter) Waksman & Henrici, *Rhizoctonia solani* J. G. Kuhn, *Phytophthora infestans* (Montagne) de Bary, *Phoma exigua* var. *exigua*

Acknowledgments: the research was carried out under the financial support of the Russian Science Foundation (Grant No. 24-26-20029), <https://grant.rscf.ru/site/user/bids?role=master>

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: Kotova Z. P., Danilova T. A., Danilov L. G., Arkhipov M. V. Prospects for the use of various species and strains of symbiotic bacteria (*Xenorhabdus* sp.) in the biological protection of potatoes from diseases in the European North of Russia. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2024;25(3):395–406. (In Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.3.395-406>

Received: 29.02.2024

Accepted for publication: 23.05.2024

Published online: 26.06.2024

Поиск биологических средств защиты, эффективных в отношении возбудителей грибных болезней растений, для использования их в интегрированных системах защиты растений и в качестве альтернативы химическим пестицидам в органическом земледелии привлекает всё большее внимание исследователей. Использование микроорганизмов, в том числе и энтомопатогенных нематод (ЭПН), в биологической борьбе с насекомыми-вредителями и болезнями востребовано и приобретает особую значимость в современном сельскохозяйственном производстве. Находясь в мутуалистических взаимоотношениях с симбиотическими бактериями (*Eubacteriaceae*) родов *Xenorhabdus* и *Photorhabdus*, нематоды способны заражать более тысячи видов насекомых из различных отрядов, поражая все фазы развития, кроме

яйца. Энтомопатогенные нематоды семейств *Steinernematidae* и *Heterorhabditidae* и их симбиотические бактерии в последние годы широко изучаются во всем мире как агенты микробиологического контроля численности насекомых-вредителей и возбудителей заболеваний растений [1, 2]. Инвазионные личинки нематод, активно проникая в тело насекомых, несут в его гемолимфу симбиотических бактерий, которые убивают насекомое, способствуют развитию и размножению нематод в теле. При размножении бактерии, производя комплекс метаболитов и преодолевая таким образом иммунную систему насекомых, приводят к их гибели и подавляют рост различных грибных и бактериальных возбудителей заболеваний внутри тела погибшего насекомого [3, 4, 5, 6].

Что касается фактора вирулентности симбиотических бактерий, то отмечается, что даже в пределах одного и того же вида между различными штаммами существуют различия в биологической активности [7]. Взаимосвязь между симбиотическими бактериями и их хозяевами-нематодами указывает на процессы, которые влияют на биологическую активность нематодно-бактериальных комплексов, специфичность, отбор и функцию симбионтов и в настоящее время рассматривается как модель для фундаментальных исследований в области экологии, эволюции, биохимии и молекулярной генетики симбиоза [8, 9]. По результатам исследований, например, у нематод вида *S. carpocapsae* (Weiser) установлен более высокий индекс летальности в отношении насекомых-хозяев, особенно при высоких температурах окружающей среды (25–28 °C), в то время как у *S. feltiae* и, особенно подвида *S. feltiae protense*, нематоды более активны при низких температурах [10]. Эти различные стратегии двух видов и подвида нематод могут быть связаны и с уровнем токсичности их симбиотических бактерий. Из исследований, посвященных изучению эффективности различных изолятов бактерий-симбионтов против насекомых, вид *X. Nematophilus* оценивается как более агрессивный и смертоносный, чем *X. bovienii* при температурах выше 25 °C. Таким образом, можно предположить, что у нематодно-бактериальных комплексов существует баланс между двумя организмами, который делает виды и штаммы симбиотических бактерий хорошими кандидатами для использования в качестве биологических агентов. Кроме того, стабильность продуцируемых симбиотическими бактериями вторичных метаболитов при автоклавировании повышает эффективность работы с такими соединениями и их хранением [7]. Жидкие культуры видов и штаммов *Xenorhabdus* эффективны против широкого спектра вредителей растений от бактерий до грибов, простейших и насекомых. Вторичные метаболиты, продуцируемые *Xenorhabdus budapesti*, например, эффективно снижают показатели фитофтороза яблонь, а также оказывают сильное токсичное воздействие как на зооспоры, так и на цистоспоры *Phytophthora nicotianae* [11].

В связи с этим весьма актуальна разработка экологически безопасных технологий защиты растений картофеля от вредных организмов с использованием симбиотических бактерий ЭПН и продуктов их метаболизма.

Цель исследования – оценить возможность использования живых и автоклавированных культур симбиотических бактерий рода *Xenorhabdus*, энтомопатогенных нематод семейства *Steinernematidae* в биологической защите картофеля от возбудителей заболеваний.

Научная новизна – в результате изучения и оценки эффективности продуктов метаболизма различных видов и штаммов симбиотических бактерий рода *Xenorhabdus* энтомопатогенных нематод сем. *Steinernematidae* против возбудителей заболеваний растений картофеля показана перспективность дальнейшей работы в данном направлении и возможности полифункционального использования препаратов, изготавливаемых на основе энтомопатогенных нематод и симбиотических бактерий.

Материал и методы. Лабораторные исследования проводили на базе Всероссийского института защиты растений (г. Пушкин). Виды и штаммы симбиотических бактерий, используемые в экспериментах, были получены путем заражения гусениц большой вошинной моли (*Galleria mellonella*) видами нематод *S. carpocapsae*, *S. feltiae* и подвида *S. feltiae protense*. Трупы погибших от заражения нематодами насекомых поверхностно стерилизовали в 70%-ном спирте в течение 2 мин. и помещали для сушки в ламинарный поток воздуха в течение 3 мин. Затем из ложноножки отдельной гусеницы стерильно отбирали каплю гемолимфы, которую переносили в чашку Петри на питательную среду NBTA и инкубировали при 26 °C.

После 72 часов отбирали чистые колонии симбиотических бактерий (зеленые) из колоний одинакового размера и морфологии. Идентификацию первичных форм симбиотических бактерий проводили по методу Акхурста (R. J. Akhurst) [12]. В лабораторных опытах при оценке влияния симбиотических бактерий и продуктов их метаболизма на возбудителей заболеваний картофеля грибные патогены высевали в чашки Петри на среду Чапека и выращивали при 25 °C в течение 5–7 суток. В качестве контроля использовали среду NBTA без симбиотических бактерий. Все варианты опытов и контроля были заложены в 4-кратной повторности.

Антибиотическую активность симбиотических бактерий определяли методом креста по диаметру зоны роста патогена при 20–25 °C. Учеты ингибирующего действия бактерий на патогены проводили на 2, 3 и 4 дни [13]. На основании сравнительной оценки антибиотической активности симбиотических бактерий по зоне ингибирования роста грибов определяли

их антибиотическую активность в отношении тестируемых видов. Биологическую активность рассчитывали по формуле У. С. Эббот (W. S. Abbott)¹.

Полевые исследования проводили в 2022-2023 годах в Пряжинском районе Республики Карелия на среднераннем картофеле сорта Ред Скарлетт, который характеризуется восприимчивостью к возбудителю фитофтороза². Почвы участка – дерновые слабоподзолистые, легкосуглинистые, хорошо окультуренные (рН_{сол.} – 5,1, содержание гумуса – 3,9 %, подвижного фосфора – P₂O₅ > 250, калия – K₂O – 168 мг на 1 кг почвы).

В полевых и лабораторных экспериментах использовали отдельные варианты живых и автоклавированных культур бактерий с соответствующим обозначением. Культуры бактерий вида *X. nematophila* – симбионта нематод *S. carpocapsae* обозначены соответственно – ЭПН-1 и ЭПН-1-1, *X. bovienii* – симбионта нематод *S. feltiae* – ЭПН-2 и ЭПН-2-2, *X. bovienii* – симбионта нематод *S. feltiae protense* – ЭПН-3 и ЭПН-3-3. Титр живых и автоклавированных культур составлял 10⁷ КОЕ/мл. Для сравнительной оценки эффективности в качестве эталона в опытах использовали Фитоспорин-М (паста).

Схема полевого эксперимента включала 8 вариантов: 1 – обработка Фитоспорин-М; 2, 3, 4, 5, 6, 7 – обработка соответствующей суспензией различных культур бактерий: ЭПН-1, ЭПН-2 ЭПН-3 (живые культуры) и ЭПН-1-1, ЭПН-2-2, ЭПН-3-3 (автоклавированные культуры); 8 – контроль (без обработок).

Обработки проводили перед посадкой клубней и дважды по вегетирующим растениям в фазы «полные всходы» (III декада июня) и «начало цветения» (III декада июля). Расход рабочего раствора – 40 л/га. Площадь опытной делянки – 3 м² (1,5х2 м), повторность – шестикратная, размещение вариантов – рендомизированное. Посадка картофеля проведена в 2022 году 4 июня, в 2023 году – 20 мая. Агротехника, применяемая в опытах – общепринятая для региона. Основную уборку проводили после скашивания ботвы. Учет урожая – сплошным весовым методом. Достоверность различий средних значений отдельных свойств оценивали на 5%-ном уровне значимости по критерию Фишера. Полученные результаты обрабатывали методом дисперсионного анализа с

использованием пакета статистических программ Statistica 12.1 (Stat-SoftInc., USA).

Расчёт развития болезней: парши обыкновенной (*Streptomyces scabies* (Thaxter) Waksman & Henrici), ризоктониоза (*Rhizoctonia solani* J. G. Kuhn), фитофтороза (*Phytophthora infestans* (Montagne) de Bary, фомоза (*Phoma exigua* var. *exigua*) проводили по формуле:

$$R = \frac{\Sigma(A \times B)}{N \times K} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где R – развитие болезни, %; $\Sigma(A \times B)$ – сумма произведений числа больных растений (A) на соответствующий им балл поражения (B); N – общее количество учтённых растений (здоровых и больных); K – высший балл шкалы учёта.

Оценку эффективности биопрепаратов рассчитывали путём сравнения развития болезни в опытном и контрольном вариантах на дату учета по формуле:

$$БЭ = \frac{R_k - R_0}{R_k} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где БЭ – биологическая эффективность, %; R_k – развитие болезни в контрольном варианте, %; R_0 – развитие болезни в опытном варианте, %.

Результаты и их обсуждение. В лабораторных условиях нами изучено действие продуктов метаболизма трех изолятов симбиотических бактерий рода *Xenorhabdus*, выделенных из природных популяций энтомопатогенных нематод (ЭПН) в отношении грибов-возбудителей заболеваний растений *F. culmorum*, *F. solani* и *A. solani*. На основании сравнительной оценки антибиотической активности симбиотических бактерий по зоне ингибирования роста грибов установлены различия первичных форм продуцентов *Xenorhabdus*, выделенных из изучаемых видов ЭПН. Антигрибная активность у всех испытуемых штаммов была наиболее высокой при их использовании против *A. solani*. При этом наибольшее ингибирование зоны роста данного гриба при температуре 25 °С отмечено на 4-й день у метаболитов штамма *S. carpocapsae* – 18,5±0,9 мм (рис. 1).

Несколько ниже по сравнению с *S. carpocapsae* по антибиотической активности показали себя метаболиты штаммов *S. feltiae* и *S. feltiae protense*, у которых зона роста гриба составила в диапазоне от 25±1,2 до 28±1,6 мм. Нами не выявлена существенная антигрибная активность всех испытуемых

¹Abbott W. S. A method of computing the effectiveness of an insecticide. Journal of Economic Entomology. 1925;18:265–267.

²Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию. Сорта растений (официальное издание). М., 2018. Т.1. 504 с.

штаммов бактерий при температуре 25 °C при использовании их против *F. solani* и *F. culmorum*. Вместе с тем у гриба *F. culmorum* отмечается незначительное снижение зоны его роста при внесении *S. feltiae* и *S. protense*.

Более наглядно выглядит сравнительная характеристика антибиотической активности исследуемых изолятов бактерий при оценке их биологической эффективности против трех видов грибов (рис. 2).

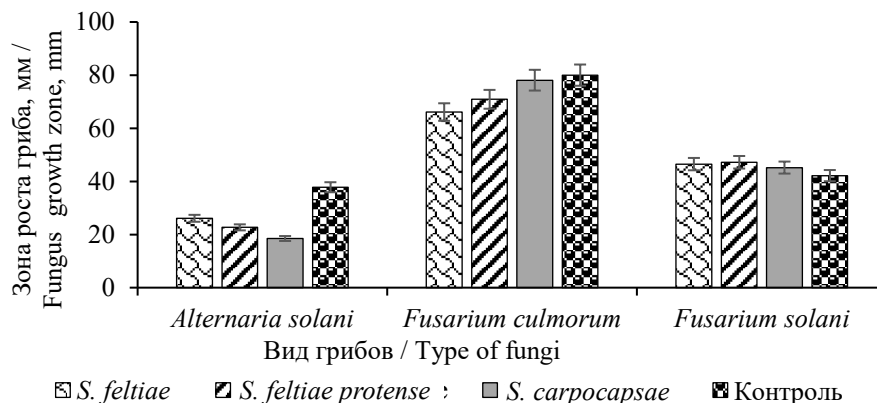


Рис. 1. Антибиотическая активность симбиотических бактерий (*Xenorhabdus*), выделенных из природных популяций энтомопатогенных нематод (*Rhabditida: Steinernematidae*), 25 °C /

Fig. 1. Antibiotic activity of symbiotic bacteria (*Xenorhabdus*) isolated from natural populations of entomopathogenic nematodes (*Rhabditida: Steinernematidae*), 25 °C

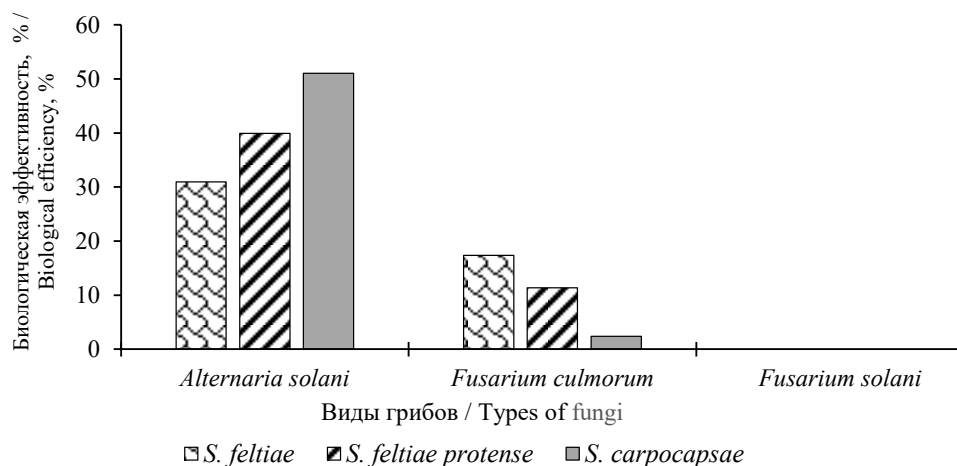


Рис. 2. Биологическая эффективность ЭПН против патогенов (*F. culmorum*, *F. solani* и *A. solani*), 25 °C /

Fig. 2. Biological effectiveness of EPN against pathogens (*F. culmorum*, *F. solani* and *A. solani*), 25 °C

Наибольшая эффективность в подавлении *A. solani* (51,3 %) отмечена также у *S. carpocapsae*. У метаболитов штаммов *S. feltiae* и *S. feltiae protense* эти показатели составили соответственно 31 и 40 %. У гриба *F. culmorum* биологическая эффективность изучаемых штаммов колебалась в диапазоне от 5 до 15 %. Бактерии-симбионты нематод исследуемых штаммов против *F. solani* по биологической эффективности имели отрицательные показатели.

Таким образом, в результате изучения действия продуктов метаболизма 3 видов и штаммов симбиотических бактерий рода

Xenorhabdus в отношении грибов-возбудителей заболеваний растений (*F. culmorum*, *F. solani* и *A. solani*) при температуре 25 °C установлено, что все они проявляют антибиотическую активность против патогенных грибов *A. solani* и *F. culmorum*. В то же время при температуре 25 °C изучаемые метаболиты оказались малоэффективными против гриба *F. solani*. В этой связи считаем необходимым продолжить исследования в направлении более детального изучения влияния температуры на антибиотическую активность видов и штаммов симбиотических бактерий ЭПН.

Полученные результаты лабораторных опытов вызвали необходимость их проверки в полевых условиях. При этом была поставлена задача оценить перспективы применения трех видов и штаммов симбиотических бактерий (*Xenorhabdus sp.*) в биологической защите картофеля от широкого спектра грибных болезней в условиях Европейского Севера России при более контрастном температурно-влажностном режиме.

Агрометеорологические условия полевых сезонов 2022-2023 гг. представлены в таблице 1. Условия вегетации растений картофеля в 2022 году были достаточно благоприятными для его выращивания: полные всходы отмечены уже через три недели, распределение осадков было неравномерным, развитие фитофтороза шло доста-

точно медленно. Вегетационный период 2023 года сложился крайне неблагоприятно для развития картофеля: средние температуры июня месяца и отсутствие осадков во время начальной фазы вегетации (всходы) привели к появлению полных всходов картофеля лишь спустя 5 недель. Выпавшие осадки в июле месяце превысили средние многолетние показатели этого периода в 1,8 раза. Такая увлажненность и невысокие температуры способствовали эпифитотийному развитию фитофтороза на листьях. Визуальный осмотр состояния опытных посадок показал, что на 5 августа основная масса листьев была поражена фитофторой, оцениваемой от 1 до 3 баллов. Из-за возможности проникновения спор заболевания в клубни было принято решение убрать ботву.

Таблица 1 – Характеристика агрометеорологических условий вегетационных периодов 2022-2023 гг. (по данным архива погоды на метеостанции)³
Table 1 – Characteristics of agro-meteorological conditions of the growing seasons 2022-2023 (according to the weather archive at the weather station)

Месяц / Month	2022 г.	2023 г.	Среднее многолетнее значение / Average perennial value
Среднемесячная температура воздуха, °C / Average monthly air temperature, °C			
Май / May	8,6	12,7	7,3
Июнь / June	15,3	13,8	13,5
Июль / July	18,8	15,6	16,0
Август / August	18,3	19,2	14,0
Среднее за вегетацию / For the growing season average	17,5	15,3	16,9
Сумма осадков, мм / Precipitation amount, mm			
Май / May	9,9	10,1	41,0
Июнь / June	71,5	38,6	59,0
Июль / July	104,6	155,8	85,0
Август / August	102,5	2,0	70,0
Сумма за вегетацию / The amount for the growing season	278,6	196,4	255,0
Гидротермический коэффициент по Селянинову / Selyaninov hydrothermal coefficient			
За вегетацию / During the growing season	1,8	1,8	-

Проведенные фенологические наблюдения и данные биометрических измерений показали, что фазы роста и развития растений картофеля по вариантам наступали одновременно. Изучаемые суспензии в виде живой культуры симбиотических бактерий оказали положительное влияние на рост и развитие растений в начальной фазе роста. Измерение высоты растений в фазу «полные всходы»

показало, что ЭПН-2 достоверно увеличивали этот показатель по сравнению с необработанными растениями на 7 % (табл. 2). Во время цветения исследуемые суспензии симбиотических бактерий также существенно влияли на высоту растений (за исключением ЭПН-2) и стеблеобразование, увеличивая значения показателей по сравнению с контролем соответственно на 5–11 и 18–63 %.

³Погода в Петрозаводске. [Электронный ресурс]. URL: https://m.rp5.ru/Погода_в_Петрозаводске (дата обращения: 12.01.2024)

Таблица 2 – Влияние симбиотических бактерий *Xenorhabdus* на биометрические показатели растений картофеля сорта Ред Скарлетт в различные фазы роста и развития (среднее за 2 года) /
Table 2 – The effect of symbiotic *Xenorhabdus* bacteria on the biometric parameters of 'Red Scarlet' potato plants in various phases of growth and development (average over 2 years)

Вариант опыта / Variant of the experiment	Полные всходы / Full germination		Цветение / Flowering			
	высота, см / height, cm	% от кон- троля / % of control	высота, см / height, cm	% от кон- троля / % of control	кол-во побегов, шт/раст. / shoots, pieces/ plant	% от кон- троля / % of control
Фитоспорин М / Fitosporin M	17,2	90	49,2	104	3,7	137
ЭПН / EPN-1	19,0	99	51,3	109	3,2	118
ЭПН / EPN-1-1	17,4	91	50,7	107	3,4	127
ЭПН / EPN-2	20,5	107	47,5	101	4,2	156
ЭПН / EPN-2-1	16,3	85	52,6	111	3,3	122
ЭПН / EPN-3	20,3	106	51,5	109	4,4	163
ЭПН / EPN-3-1	17,8	93	49,8	105	3,4	126
Контроль / Control	19,1	-	47,2	-	2,7	-
Стандарт. откл., ± / Standard deviation, ±	1,4	-	1,7	-	0,4	-

Наибольшее количество побегов наблюдали при обработке растений картофеля водной суспензией живых культур симбиотических бактерий нематод *S. feltiae protense* (ЭПН-2) и *S. feltiae* (ЭПН-3), что выше контроля на 56–63 % соответственно.

Иммунологическая оценка устойчивости клубней картофеля к патогенам, проведенная после уборки, показала высокую эффективность изучаемых видов симбиотических бактерий (табл. 3). В 2022 году, достаточно благоприятном для выращивания картофеля, все они снижали число клубней, пораженных паршой обыкновенной в 1,3–2,8 раза. Наиболее эффективной отмечена двукратная обработка водной суспензией живых культур симбиотических бактерий, она способствовала уменьшению степени развития симптомов болезни на клубнях до 4 %, в контроле – 21 %. В зависимости от вида применяемых симбиотических бактерий распространение ризоктониоза снижалось на 38–69 %, а степень его развития в 1,5–2,0 раза по сравнению с контрольным вариантом. Максимальное ингибирование гриба *Rhizoctonia solani* вызывала обработка вегетирующих растений водной суспензией живых и автоклавированных культур симбиотических бактерий культур ЭПН-1 и ЭПН-1-1, при которой отмечалось снижение степени развития болезни до 6,0 % против 12 % в контроле.

В эписитотийном 2023 году двукратное опрыскивание вегетирующих растений культурами бактерий ЭПН-1-1, ЭПН-2 и ЭПН-2-1 способствовало снижению заболеваемости ризоктониозом по сравнению с контрольным вариантом на 50, 64 и 60 % соответственно. Другие живые суспензии симбиотических бактерий были менее эффективны, но их применение также снижало развитие ризоктониоза по сравнению с контролем на 10–44 %. Высокие показатели по сдерживанию грибной инфекции на клубнях картофеля получили при использовании суспензии симбиотических бактерий подвида *S. feltiae protense* (ЭПН-2) (табл. 3).

Наши исследования согласуются с выводами других авторов, свидетельствующими о том, что вирулентность симбионтов, даже в пределах одного и того же вида, между различными штаммами различается по биологической активности [7]. Так, нематоды вида *S. carpocapsae*, как и их симбиотические бактерии, показали более высокий индекс летальности в отношении насекомых-хозяев, особенно при высоких температурах окружающей среды (25–28 °C), в то время как *S. feltiae* и, особенно *S. feltiae protense*, работали лучше при более низких температурах [11].

Таблица 3 – Действие двукратной обработки культурами симбиотических бактерий (*Xenorhabdus*) на распространение и развитие патогенов на клубнях картофеля сорта Ред Скарлетт в 2022 и 2023 гг./
Table 3 – The effect of double treatment with cultures of symbiotic bacteria (*Xenorhabdus*) on the spread and development of pathogens on potato tubers of the ‘Red Scarlet’ variety in 2022 and 2023

Вариант опыта / Variants of the experiment	<i>Streptomyces scabies</i>		<i>Rhizoctonia solani</i>		<i>Phytophthora infestans</i>		<i>Phoma foveatam</i>	
	P*, %	R**	P, %	R	P, %	R	P, %	R
Фитоспорин-М / Fitosporin-M	$\frac{27,5}{0}$	$\frac{7,5}{0}$	$\frac{30}{15,1}$	$\frac{7,9}{3,8}$	$\frac{0}{1,4}$	$\frac{0}{1,0}$	$\frac{0}{3,6}$	$\frac{0}{0,9}$
ЭПН / EPN-1	$\frac{15}{0}$	$\frac{3,8}{0}$	$\frac{24}{16,3}$	$\frac{6}{4,1}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{1,9}$	$\frac{0}{0,5}$
ЭПН / EPN-1-1	$\frac{33}{0}$	$\frac{9,2}{0}$	$\frac{38}{9}$	$\frac{5,8}{2,2}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{2}$	$\frac{0}{0,5}$
ЭПН / EPN-2	$\frac{-}{0}$	$\frac{-}{0}$	$\frac{-}{6,5}$	$\frac{-}{1,6}$	$\frac{-}{0,8}$	$\frac{-}{0,6}$	$\frac{-}{0,6}$	$\frac{-}{0,1}$
ЭПН / EPN-2-1	$\frac{-}{0}$	$\frac{-}{0}$	$\frac{-}{7,3}$	$\frac{-}{1,8}$	$\frac{-}{0}$	$\frac{-}{0}$	$\frac{-}{4,8}$	$\frac{-}{1,2}$
ЭПН / EPN-3	$\frac{-}{0,7}$	$\frac{-}{0,4}$	$\frac{-}{10,5}$	$\frac{-}{2,6}$	$\frac{-}{0}$	$\frac{-}{0}$	$\frac{-}{1,3}$	$\frac{-}{0,3}$
ЭПН / EPN-3-1	$\frac{-}{0}$	$\frac{-}{0}$	$\frac{-}{12,5}$	$\frac{-}{3,1}$	$\frac{-}{1,1}$	$\frac{-}{0,7}$	$\frac{-}{1,1}$	$\frac{-}{0,3}$
Контроль / Control	$\frac{42}{4,5}$	$\frac{20,8}{5,2}$	$\frac{78}{18,2}$	$\frac{12,1}{4,5}$	$\frac{0}{4,5}$	$\frac{0}{5,2}$	$\frac{0}{4,5}$	$\frac{0}{1,1}$

*P – распространение болезни / spread of disease; **R – развитие болезни / development of the disease; числитель / numerator – 2022 г., знаменатель / denominator – 2023 г.

Ранее другими исследователями было показано, что использование продуктов метаболизма симбиотических бактерий энтомопатогенных нематод способствовало подавлению развития парши обыкновенной *Streptomyces scabies*, увеличению активности пероксидазы в листьях картофеля *Solanum tuberosum* L., урожайности и качества клубней, а также повышению уровня ферментативной активности в почве в конце вегетационного периода растений. Также было установлено, что в опытах *in vitro* обработка продуктами метаболизма симбиотических бактерий повышает устойчивость картофеля к заражению возбудителем фитофтороза. Кроме того, в тканях клубней, зараженных фитофторой, отмечалось уменьшение количества некротических клеток и активности каталазы в 1,7 раза [14].

Результаты наших лабораторных экспериментов и двухлетние полевые исследования подтверждают тот факт, что у нематодно-бактериальных комплексов существует баланс между двумя организмами, в частности между нематодами и их симбионтами: *S. Feltiae*/X. *Bovienii* или *S. carpocapsae*/X. *nematophila*. Такой комплекс может быть использован в качестве биологического агента, контролирующего комплекс организмов-вредителей растений.

Аналогичные симбиотические связи между двумя организмами симбионтами отмечают и другими авторами [15]. Кроме того, стабильность продуцируемых этими микроорганизмами вторичных метаболитов при автоклавировании в режиме 121 °C в течение 20 мин, вероятно, повышает простоту работы с такими соединениями и их хранением [7].

В наших исследованиях биологическая эффективность (БЭ) изучаемых симбиотических бактерий по вариантам опыта составила: против *S. Scabies* – 82–100 %; *R. solani* – 25–64 %; *P. infestans* – 88–100 %; *P. foveatam* – 38–75 % (рис. 3). Показано, что в целом симбиотические бактерии более эффективны на клубнях против парши обыкновенной и фитофтороза. Максимальный эффект отмечали при двукратном опрыскивании листовой поверхности ЭПН-2 и ЭПН-3.

Всесторонняя оценка действия видов и штаммов симбиотических бактерий рода *Xenorhabdus* в развитии растений выявила не только антибактериальный эффект, но и фиторегуляторный. Так, при обработке клубней и растений картофеля в фазы «полные всходы» и «начало цветения» отмечали ускоренное их развитие во время вегетации и, как следствие, увеличение урожайности по сравнению с контрольным (не обработанным) вариантом (табл. 4).

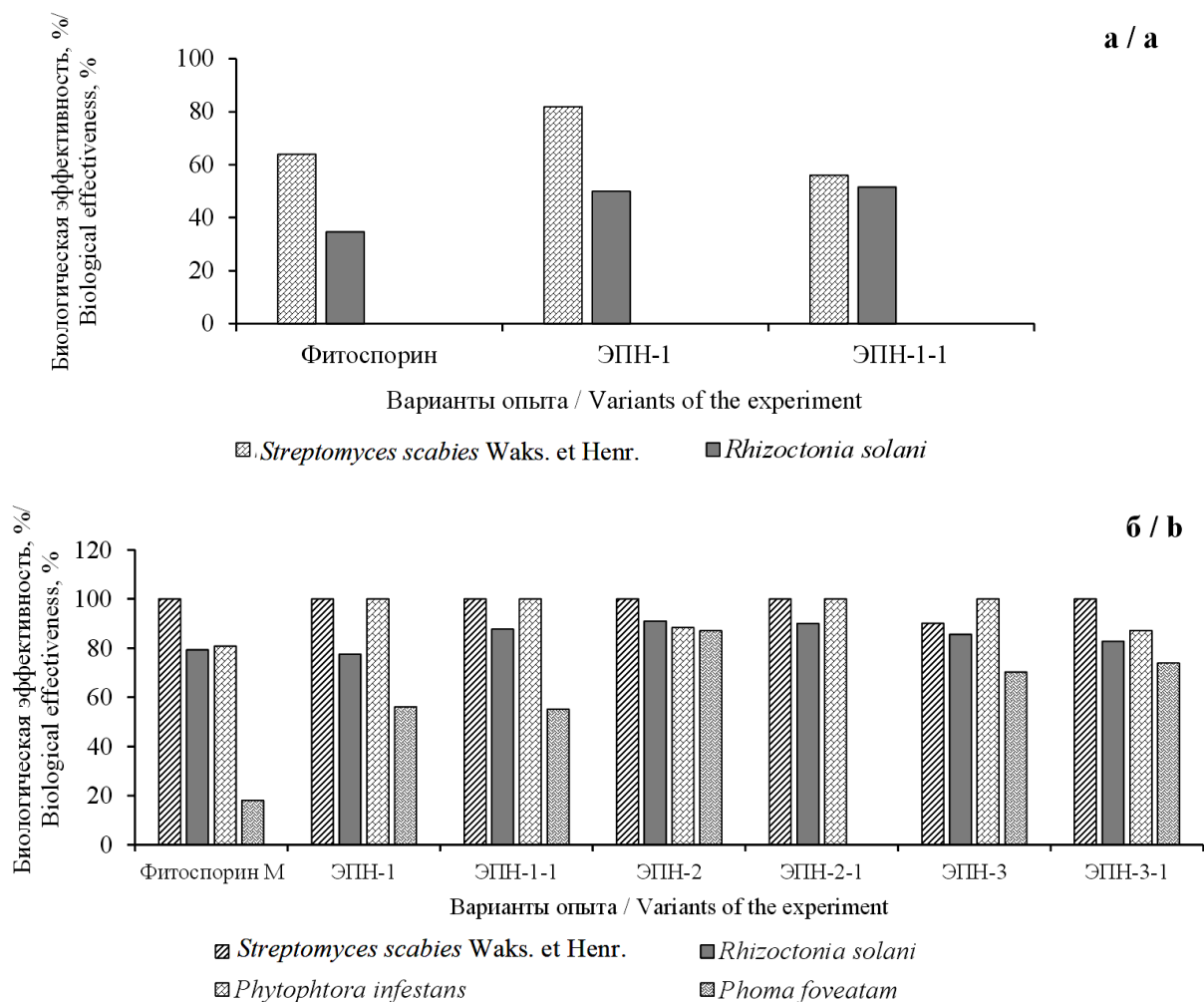


Рис. 3. Биологическая эффективность *Xenorhabdus* (%) на клубнях картофеля сорта Ред Скарлетт от различных патогенов: а – 2022 г.; б – 2023 г. /

Fig. 3. Biological effectiveness of *Xenorhabdus* (%) against various pathogens on tubers of the 'Red Scarlett' potato variety: a – 2022; b – 2023

Таблица 4 – Урожайность картофеля сорта Ред Скарлетт в зависимости от обработок различными видами *Xenorhabdus* /

Table 4 – The yield of 'Red Scarlett' potatoes depending on the treatments with various types of *Xenorhabdus*

Вариант опыта / Variant of the experiment	Урожайность, т/га / Productivity, t/ha			К контролю / To control			
	2022 г.	2023 г.	среднее / average	2022 г.	2023 г.	2022 г.	2023 г.
Фитоспорин М / Fitosporin M	35,44	16,66	26,05	7,31	-0,12	126	99
ЭПН / EPN-1	32,66	14,64	23,65	4,53	-2,14	116	87
ЭПН / EPN-1-1	36,68	17,20	26,94	8,55	0,42	130	102
ЭПН / EPN-2	-*	22,72	22,72	-	5,94	-	135
ЭПН / EPN-2-1	-	20,45	20,45	-	3,67	-	122
ЭПН / EPN-3	-	20,0	20,00	-	3,22	-	119
ЭПН / EPN-3-1	-	19,3	19,30	-	2,52	-	115
Контроль / Control	28,13	16,78	22,46	-	-	-	-
HCP / LSD ₀₉₅	2,06	1,41	-	-			

*По данным вариантам в 2022 г. исследования не проводили /

* No studies were conducted by these variants in 2022

Как видно из данных таблицы 4, урожайность клубней картофеля в эпифитотийном 2023 году была значительно ниже по вариантам опыта в среднем в два раза по сравнению с благоприятным для выращивания картофеля 2022 годом. Если учесть, что листья картофеля на 05.08.2023 были на 100 % поражены *P. infestans* и удалены (скошены), то влияние изучаемых симбиотических бактерий было существенным на начальном этапе роста и развития растений. Стимулирующий эффект препаратов на основе бактерий рода *Xenorhabdus* сопровождается увеличением побегообразования и вегетирующей массы растений и, как следствие, усилением физиологических ростовых процессов и клубнеобразования [16].

В 2022 году положительное действие на клубнеобразование оказали исследуемые штаммы живых и автоклавированных культур ЭПН-1 и ЭПН-1-1, двукратное опрыскивание которыми способствовало увеличению урожайности клубней по сравнению с контролем на 16–30 % соответственно. Наибольшее увеличение урожайности клубней в 2023 году отмечено в вариантах с применением живых и автоклавированных культур симбиотических бактерий *X. bovienii* – симбионта нематод *S. feltiae* – ЭПН-2 (35 %) и ЭПН-2-1 (22 %). Несколько меньшие показатели по урожайности клубней получены от применения *X. bovienii* – симбионта нематод *S. feltiae protense* – ЭПН-3 (19 %) и ЭПН-3-1 (15 %), однако все они значительно превышали результаты по применению живых и автоклавированных культур бактерий вида *X. nematophila* – симбионта нематод *S. carpocapsae* (ЭПН-1 и ЭПН-1-1). Полученные нами результаты подтверждают тот факт, что при неблагоприятных условиях (низкие температуры) эффективность симбиотических бактерий *S. feltiae* и *S. feltiae protense* значительно выше *S. carpocapsae* [12].

Заключение. Оценка влияния продуктов метаболизма культур и изолятов симбиотических бактерий рода *Xenorhabdus*, выделенных из природных популяций энтомопатогенных нематод (*Rhabditida: Steinernematidae*) ЭПН, в отношении грибов-возбудителей заболеваний растений – *F. culmorum*, *F. solani* и *A. solani* показала, что антигрибная активность у всех испытуемых штаммов была наиболее высокой при использовании их против *A. solani*. Наибольшее ингибирование зоны роста гриба отмечено у метаболитов штамма *X. nematophila*.

Таким образом, симбиотические бактерии и продукты их метаболизма как в условиях *in vitro*, так и *in vivo* продемонстрировали значительные возможности их использования

в биологической защите растений картофеля от грибных патогенов. Практическое внедрение такого экологически безопасного метода снижения пораженности растений опасными патогенами представляет значительный экономический интерес в сельскохозяйственном производстве. Однако многие вопросы, связанные с эффективным внедрением и получением необходимых результатов, требуют дополнительных исследований.

Полученные экспериментальные данные полевых исследований по эффективности использования продуктов метаболизма симбиотических бактерий против грибов-возбудителей заболеваний растений свидетельствуют о правильности выбранного направления работы в изучении возможностей полифункционального использования препаратов, изготавливаемых на основе энтомопатогенных нематод и продуктов метаболизма различных видов и штаммов симбиотических бактерий. Продукция вторичных метаболитов с антибиотическими свойствами является общей характеристикой энтомопатогенных бактерий *Xenorhabdus* spp. Изучаемые нами бактериальные культуры оказывали полифункциональное действие: положительно влияли на рост и развитие растений на начальных этапах. Выявлено, что высота растений в фазу «полные всходы» при применении препарата ЭПН-2 достоверно превышала контрольный вариант на 7 %, в последующие периоды роста (фаза «цветение») все исследуемые препараты существенно влияли на высоту и побегообразование, в среднем на 5–11 % и 18–61 %.

При двукратной обработке водной суспензией бактерий, симбионтов подвида *S. feltiae protense* получили наилучшие показатели по сдерживанию грибной инфекции на клубнях и уменьшению степени развития симптомов парши обыкновенной в 1,3–2,8 раза, а также распространению ризоктониоза в 1,5–2,0 раза. Полифункциональное действие штаммов симбиотических бактерий рода *Xenorhabdus* проявилось не только в подавлении патогенной инфекции на клубнях, но и способствовало усиленному клубнеобразованию. При неблагоприятных погодных условиях применение культур этих бактерий сопровождалось получением и большей урожайности клубней (на 22–35 %) по сравнению с необработанным вариантом как при применении суспензии живых, так и автоклавированных культур бактерий. В благоприятных для выращивания культуры условиях при более высокой температуре наиболее эффективным отмечен автоклавированный штамм симбиотических бактерий

нематод *S. carpocapsae*, применение которого позволило увеличить урожай клубней на 30 %. *S. carpocapsae* показал лучшую эффективность при более высоких температурах окружающей среды (25–28 °C), *S. feltiae* и *S. feltiae protense* действовали лучше при более низких.

Таким образом, всесторонняя оценка влияния продуктов метаболизма симбиотических бактерий *Xenorhabdus* sp. энтомопатогенных нематод *S. feltiae*, *S. feltiae protense*, *S. carpocapsae* на патогенную инфекцию клубней картофеля свидетельствует об их высокой эффективности против *Streptomyces scabies*,

Rhizoctonia solani, *Phytophthora infestans*, *Phoma foveatam*. Полученные экспериментальные данные по эффективности использования продуктов метаболизма симбиотических бактерий *Xenorhabdus* против грибов-возбудителей заболеваний растений на картофеле указывают на перспективы дальнейшей работы по изучению возможностей полифункционального использования препаратов, изготавливаемых на основе энтомопатогенных нематод и продуктов метаболизма различных видов и штаммов симбиотических бактерий.

References

1. Shapiro-Ilan D., Hazir S., Glazer I. Advances in use of entomopathogenic nematodes in integrated pest management. In: Kogan M., Heinrichs E. A. (eds). Integrated management of insect pests: current and future developments. Burleigh Dodds Science Publication. UK, 2020. pp. 1–30. DOI: <https://doi.org/10.19103/AS.2019.0047.19>
2. Gawad M. A., Ruan W., Hammam M. M. A. Entomopathogenic Nematodes: Integrated Pest Management and New Vistas. Egyptian Journal of Agronomatology. 2023;22(1):1–18. DOI: <https://doi.org/10.21608/ejaj.2023.280551>
3. Павлюшин В. А., Новикова И. И., Бойкова И. В. Микробиологическая защита растений в технологиях фитосанитарной оптимизации агроэкосистем: теория и практика (обзор). Сельскохозяйственная биология. 2020;55(3):421–438. DOI: <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2020.3.421rus> EDN: FEAOFP
4. Pavlyushin V. A., Novikova I. I., Boykova I. V. Microbiological control in phytosanitary optimization technologies for agroecosystems: research and practice (review). *Sel'skokhozyaystvennaya biologiya* = Agricultural Biology. 2020;55(3):421–438. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2020.3.421rus>
5. Wright P. J. Morphological characterisation of the entomogenous nematodes *Steinernema* spp. and *Heterorhabditis* spp. (Nematoda: Rhabditida). New Zealand Journal of Zoology. 1990;17(4):577–585. DOI: <https://doi.org/10.1080/03014223.1990.10422955>
6. Boemare N., Biology, Taxonomy and Systematics of *Photorhabdus* and *Xenorhabdus*. In: Gaugler R. (ed.). In book: Entomopathogenic nematology. CABI Publishing, CAB International, 2002. pp. 35–56. DOI: <https://doi.org/10.1079/9780851995670.0035>
7. Данилов Л. Г., Павлюшин В. А. Разработка и реализация инновационного проекта по созданию опытного производства биологических препаратов на основе энтомопатогенных нематод. Вестник защиты растений. 2019;(2(100)):52–55. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39132362> EDN: ISYMPB
8. Danilov L. G., Pavlyushin V. A. Development and implementation of an innovative project on the establishment of experimental production of biological preparations based on entomopathogenic nematodes. *Vestnik zashchity rasteniy* = Plant Protection News. 2019;(2(100)):52–55. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39132362>
9. Brivio M. F., Mastore M. Nematobacterial Complexes and Insect Hosts: Different Weapons for the Same War. Insects. 2018;9(3):117. DOI: <https://doi.org/10.3390/insects9030117>
10. Bisch G., Ogier J. C., Médigue C., Rouy Z., Vincent S., Tailliez P., Givaudan A., Gaudriault S. Comparative genomics between two *Xenorhabdus bovienii* strains highlights differential evolutionary scenarios within an entomopathogenic bacterial species. Genome Biology and Evolution. 2016; 8(1):148–160. DOI: <https://doi.org/10.1093/gbe/evv248>
11. Murfin K. E., Whooley A. C., Klassen J. L., Blair H. G. Comparison of *Xenorhabdus bovienii* bacterial strain genomes reveals diversity in symbiotic functions. BMC Genomics. 2015;16:889. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12864-015-2000-8>
12. Иванова Т. С., Ивахненко О. А., Данилов Л. Г. Новый подвид энтомопатогенных нематод семейств *Steinernema feltiae protensesubsp.* N. (Nematoda: Steinernematidae) из Якутии. Паразитология. 2001;35(4):333–337. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26019417> EDN: VXJYQB
13. Ivanova T. S., Ivakhnenko O. A., Danilov L. G. A new entomopathogenic nematode *Steinernema feltiae protense subsp.* N. (Nematoda: Steinernematidae) from Yakutia. *Parazitologiya*. 2001;35(4):333–337. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26019417>
14. Boszormenyi E., Ersek T., Fodor A., Fodor A. M., Foldes L. S., Hevesi M., Hogan J. S., Katona Z., Klein M. G., Kormany A., Pekar S., Szentirmai A., Sztaricskai F., Taylor R. A. J. Isolation and activity of *Xenorhabdus* antimicrobial compounds against the plant pathogens *Erwinia amylovora* and *Phytophthora nicotianae*. Journal of Applied Microbiology. 2009;107(3):746–759. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2009.04249.x>
15. Akhurst R. J. Morphological and Functional Dimorphism in *Xenorhabdus* spp., Bacteria Symbiotically Associated with the Insect Pathogenic Nematodes *Neoaplectana* and *Heterorhabditis* Free. Journal of General Microbiology. 1980;121(2):303–309. DOI: <https://doi.org/10.1099/00221287-121-2-303>

13. Данилов Л. Г., Зорина Е. А., Нашекина Т. Ю. Антибиотическая активность *Xenorhabdus* sp. (Enterobacteriaceae) симбионтов энтомопатогенных нематод (Rhabditida: Steinernematidae). Вестник защиты растений. 2017;3(93):33–38. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30079319> EDN: ZIFWIV

Danilov L. G., Zorina E. A., Nashchekina T. Yu. Antibiotic activity of *Xenorhabdus* sp. (Enterobacteriaceae) symbiont of entomopathogenic nematodes (Rhabditida: Steinernematidae). *Vestnik zashchity rasteniy* = Plant Protection News. 2017;3(93):33–38. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30079319>

14. Агансонова Н. Е. Эффективность продуктов метаболизма симбиотических бактерий р. *Xenorhabdus* против парши обыкновенной. Защита и карантин растений. 2016;(10):25–27.

Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26738475> EDN: WNDBOV

Agansonova N. E. Effectiveness of the products of metabolism of symbiotic bacteria p. *Xenorhabdus* against the common scab. *Zashchita i karantin rasteniy*. 2016;(10):25–27. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26738475>

15. Benitez T., Rincon A. M., Limon M. C., Codon A. C. Biocontrol mechanisms of *Trichoderma* strains. *International Microbiology*. 2005;7(4):249–260.

URL: https://www.researchgate.net/publication/8065870_Biocontrol_mechanism_of_Trichoderma_strains

16. Fang X. L., Li Z. Z., Wang Y. H., Zhang X. In vitro and in vivo antimicrobial activity of *Xenorhabdus bovienii* YL002 against *Phytophthora capsici* and *Botrytis cinerea*. *Journal of Applied Microbiology*. 2011;111(1):145–154.

DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2011.05033.x>

Сведения об авторах

✉ **Котова Зинаида Петровна**, доктор с.-х. наук, ведущий научный сотрудник отдела земледелия и растениеводства, Северо-Западный Центр междисциплинарных исследований проблем продовольственного обеспечения – обособленное структурное подразделение ФГБУН «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук», ш. Подбельского, д. 7, г. Пушкин, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, 196608, e-mail: n-wcirpfm@spcras.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9770-0809>, e-mail: zinaida_kotova@mail.ru

Данилова Татьяна Алексеевна, кандидат с.-х. наук, ведущий научный сотрудник отдела земледелия и растениеводства, Северо-Западный Центр междисциплинарных исследований проблем продовольственного обеспечения – обособленное структурное подразделение ФГБУН «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук», ш. Подбельского, д. 7, г. Пушкин, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, 196608, e-mail: n-wcirpfm@spcras.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1919-0695>

Данилов Леонид Григорьевич, доктор с.-х. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории микробиологической защиты растений, ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений», ш. Подбельского, д. 3, г. Пушкин, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, 196608, e-mail: info@vizr.spb.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3623-1081>

Архипов Михаил Вадимович, доктор биол. наук, главный научный сотрудник отдела земледелия и растениеводства, Северо-Западный Центр междисциплинарных исследований проблем продовольственного обеспечения – обособленное структурное подразделение ФГБУН «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук», ш. Подбельского, д. 7, г. Пушкин, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, 196608, e-mail: n-wcirpfm@spcras.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6903-6971>

Information about the authors

✉ **Zinaida P. Kotova**, DSc in Agricultural Science, leading researcher, the Department of Agriculture and Crop Production, North-West Centre of Interdisciplinary Researches of Problems of Food Maintenance, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, sh. Podbelsky, 7, Saint-Petersburg, Russian Federation, 196608, e-mail: n-wcirpfm@spcras.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9770-0809>, e-mail: zinaida_kotova@mail.ru

Tatyana A. Danilova, PhD in Agricultural Science, leading researcher, the Department of Agriculture and Crop Production, North-West Centre of Interdisciplinary Researches of Problems of Food Maintenance, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, sh. Podbelsky, 7, Saint-Petersburg, Russian Federation, 196608, e-mail: n-wcirpfm@spcras.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1919-0695>

Leonid G. Danilov, DSc in Agricultural Science, leading researcher, the Laboratory of Microbiological Plant Protection, All-Russian Research Institute for Plant Protection, 3, sh. Podbelsky, Pushkin, Saint-Petersburg, Russian Federation. 196608, e-mail: info@vizr.spb.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3623-1081>

Mikhail V. Arkhipov, DSc in Biological Science, chief researcher, the Department of Agriculture and Crop Production, North-West Centre of Interdisciplinary Researches of Problems of Food Maintenance, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, sh. Podbelsky, 7, Saint-Petersburg, Russian Federation, 196608, e-mail: n-wcirpfm@spcras.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6903-6971>

✉ – Для контактов / Corresponding author



Многолетняя динамика численности и сезонное развитие колорадского жука на посадках картофеля в Ленинградской области в условиях потепления климата

© 2024. В. В. Смук✉

ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт»,

г. Санкт-Петербург, Российская Федерация,

ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений»,

г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Колорадский жук (*Leptinotarsa decemlineata* Say) – основной и самый опасный вредитель картофеля в России. Обладая широкими адаптивными возможностями, данный вид постепенно акклиматизируется в более северных регионах территории РФ. Северо-Западный регион до настоящего времени относился к зоне с неблагоприятными условиями для развития колорадского жука, но с потеплением климата ситуация может значительным образом измениться. В период 2012–2023 гг. в полевых опытах, проводимых на агроэкологическом стационаре Менковского филиала Агрофизического НИИ (Ленинградская область, Гатчинский район), изучали многолетнюю динамику численности и сезонное развитие колорадского жука на посадках картофеля в условиях разной теплообеспеченности летних месяцев. По результатам исследований выявлено стремительное нарастание присутствия фитофага в агроценозе картофеля (от 0,1 до 68,0 % растений на момент фазы «бутонизация-цветение»), обусловленное продолжительным (2021–2023 гг.) существенным повышением суммы активных температур в период вегетации культуры. Противоположный эффект отмечен при низком уровне температуры воздуха во вторую и третью декады июня. Понижение теплообеспеченности в данные декады ниже температурного оптимума приводило к уменьшению среднего количества яиц в кладке с 37 до 22 штук и сдвигу массового отрождения личинок на более поздние сроки (более 7 дней) вегетации культуры. Сезонная динамика численности насекомого характеризуется резким снижением плотности личинок фитофага после фазы «бутонизация» растений картофеля. Определяющим фактором массового развития колорадского жука в посадках картофеля является высокая численность насекомого на начальном этапе заселения картофельного поля. Так, при многократном (в 3,7 раза) превышении экономического порога вредоносности (ЭПВ) колорадского жука по критерию «численность перезимовавших имаго» в фазу «массовые всходы» культуры наблюдали высокий уровень (90–100 %) поврежденности растений его личинками во второй половине периода вегетации картофеля.

Ключевые слова: *Leptinotarsa decemlineata* Say, *Solanum tuberosum* L., уровень теплообеспеченности, заселенность посадок, фенология развития, поврежденность растений

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки в рамках Государственного задания ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт» (тема № FGEG-2022-0007) и государственного задания ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений» (тема № FGEU-2022-0008).

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

Конфликт интересов: автор заявил об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Смук В. В. Многолетняя динамика численности и сезонное развитие колорадского жука на посадках картофеля в Ленинградской области в условиях потепления климата. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2024;25(3):407–414. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.3.407-414>

Поступила: 18.03.2024

Принята к публикации: 24.05.2024

Опубликована онлайн: 26.06.2024

Long-term population dynamics and seasonal development of the Colorado potato beetle on potato plantings in the Leningrad region under conditions of climate warming

© 2024. Vasilii V. Smuk✉

Agrophysical Research Institute, Saint-Petersburg, Russian Federation,

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

The Colorado potato beetle (*Leptinotarsa decemlineata* Say) is the main and most dangerous pest of potatoes in Russia. Having wide adaptive capabilities, this species is gradually acclimatizing in the more northern regions of the territory of the Russian Federation. The Northwestern region has so far been considered an area with unfavorable conditions for the development of the Colorado potato beetle, but in a warming climate, the situation may change significantly. In the period of 2012–2023, field experiments conducted at the agroecological study area of the Menkovsky branch of the Agrophysical Research Institute (Leningrad region, Gatchina district) studied the long-term population dynamics and seasonal development of the Colorado potato beetle on potato plantings under conditions of different heat supply in the summer months. According to the research results, a rapid increase (from 0.1 to 68 % of plants at the time of «budding-flowering») in the presence of phytophage in the potato agroecosystem was revealed, due to a prolonged (2021–2023) significant increase in the sum of active temperatures during the growing season of the crop. The opposite effect was observed at low air temperature in the

second and third decades of June. A decrease in heat supply in these decades below the temperature optimum led to a decrease in the average number of eggs in a clutch from 37 to 22 and a shift in the mass hatching of larvae to later periods (over 7 days) of the growing season of the crop. The seasonal dynamics of insect numbers is characterized by a sharp decrease in the density of phytophagous larvae after budding of potato plants. The determining factor in the mass development of the Colorado potato beetle in potato plantings is the high number of the insect at the initial stage of colonization of the potato field. Thus, with a multiple (3.7 times) excess of the economic threshold of harmfulness according to the criterion of the number of overwintered imago of the Colorado potato beetle in the phase of mass shoots of the crop, a high level (90–100 %) of plant damage by larvae was observed in the second half of the potato growing season.

Keywords: *Leptinotarsa decemlineata* Say, *Solanum tuberosum* L., heat supply level, the population of plantings, phenology of development, plant 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 Agrophysical Research Institute (theme No. FGEG-2022-0007) and state assignment of the All-Russian Institute of Plant Protection (theme No. FGEU-2022-0008).

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

Conflict of interests: the author stated that there was no conflict of interests.

For citations: Smuk V. V. Long-term population dynamics and seasonal development of the Colorado potato beetle on potato plantings in the Leningrad region under conditions of climate warming. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2024;25(3):407–414. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.3.407-414>

Received: 18.03.2024

Accepted for publication: 24.05.2024

Published online: 26.06.2024

Колорадский жук, являясь представителем пойкилотермных живых организмов, предъявляет повышенные требования к температуре окружающей среды [1, 2, 3]. Именно этим фактом определяется то, что Ленинградская область со среднемноголетней температурой летнего периода ниже 16,5 °С была отнесена к территории с неблагоприятными условиями для массового размножения насекомого и причинения им значительного вреда [4, 5].

Не менее важным погодным критерием, способным в значительной мере негативно влиять на численность популяции колорадского жука, считается переувлажнение посадок картофеля, наблюдаемое при значениях гидротермического коэффициента (ГТК) свыше 1,5 [6].

Периодические подъемы численности колорадского жука на территории Ленинградской области были связаны не только с благоприятными по температуре и осадкам погодными условиями, но и являлись следствием заноса насекомых сильными ветрами из более южных регионов. Так было в 1981 и 1998 гг., в 2003 г. сказалось влияние двух предыдущих жарких и засушливых лет. В указанные годы наблюдалось значительное увеличение площади заселения и плотности популяции вредителя в разных районах Ленинградской области [7, 8]. При этом акклиматизация колорадского жука в северной части его ареала, ввиду сложных погодных-климатических условий, происходила медленно, и редкие годы подъема численности

менялись затяжными периодами депрессии [9, 10].

В настоящее время в связи продолжающимся потеплением климата наблюдается стремительный рост суммы активных температур на Северо-Западе России. Так, рекордно высокие температуры летних месяцев, на 2–3 °С превышающие среднемноголетние значения, были зарегистрированы в 2021–2022 гг.^{1,2}. Теплообеспеченность посадок картофеля 2023 г. также превышала среднемноголетний уровень. В итоге средняя температура летних месяцев 2021–2023 гг. составила 18 °С, что потенциально, при условии отсутствия избыточного увлажнения посадок картофеля, переводит территорию Ленинградской области на уровень относительно благоприятных условий для развития насекомого [11].

Цель исследований – провести анализ многолетней динамики численности и сезонного развития колорадского жука на посадках картофеля в изменяющихся условиях климата, связанных с ростом температур, на территории Ленинградской области.

Научная новизна – выявлены особенности влияния уровня теплообеспеченности летних месяцев на динамику развития колорадского жука в посадках картофеля на территории Ленинградской области. Определена важность температурного режима окружающей среды и плотности фитофага в начальный период вегетации культуры на конечные показатели

¹Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2021 год. М., 2022. 104 с. URL: http://climatechange.igce.ru/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=312&Itemid=73&lang=ru

²Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2022 год. М., 2023. 104 с. URL: <https://meteoinfo.ru/images/media/climate/rus-clim-annual-report.pdf>

поврежденности растений в агроценозе картофеля. В условиях продолжающегося потепления климата отмечена возможность характеристики данной территории как зоны, благоприятной для ежегодного массового размножения колорадского жука.

Материал и методы. Изучение динамики численности и особенностей развития колорадского жука во время вегетации картофеля проводили в период 2012–2023 гг. в рамках комплексных исследований фитосанитарного состояния посадок этой культуры, развернутых на агроэкологическом стационаре Меньковского филиала Агрофизического НИИ (Ленинградская обл., Гатчинский район). Стационар функционирует с 1982 г. и представляет собой 7-польный зернотравянопропашной севооборот, в котором предшественником картофеля являлись многолетние травы (2012–2017 гг.) или яровой рапс (2018–2023 гг.). Почва стационара – дерново-подзолистая супесчаная. Площадь поля – 0,6 га, делянки – 150 м² (10×15 м), повторность 6-кратная. В 2012–2017 гг. в опыте возделывали сорт картофеля Сударыня, 2018–2020 гг. – Удача, 2021–2023 гг. – Метеор. Наблюдения за динамикой заселения растений жуками, откладкой яиц, отрождением личинок и учет интенсивности повреждения листового

аппарата проводили на постоянных учетных площадках 1,4 м², ежегодно размещаемых на поле в количестве 18 штук [12]. На каждую делянку приходилась одна постоянная площадка.

Большое значение для развития колорадского жука в посадках картофеля имеет температурный режим начального периода вегетации культуры, а конкретно температура воздуха выше 14 °С во вторую декаду (массовый выход перезимовавших имаго) и выше 17 °С в третью декаду июня (начало откладки яиц). Температуры ниже указанного оптимума во второй декаде июня отмечены в 2014 и 2017 гг. (11,9 и 12,9 °С), в третью декаду июня – в 2012, 2014, 2015 и 2017–2019 гг.

Максимально благоприятными для развития колорадского жука в посадках картофеля являются вегетационные периоды с большой суммой активных температур при отсутствии понижений температуры в начальные фазы развития насекомого. Данным условиям за весь период исследований соответствовали 2021–2023 гг., характеризующиеся повышенным уровнем теплообеспеченности, в сравнении как с предыдущими годами, так и среднеголетними значениями активной вегетации культуры (табл. 1).

Таблица 1 – Динамика средних декадных температур за период вегетации картофеля в годы проведения исследований (по данным метеопоста Меньковского филиала Агрофизического НИИ, Ленинградская обл., Гатчинский район) /

Table 1 – Dynamics of average decadal temperatures during the growing season of potatoes in the years of the research (according to the data of meteorological station of the Menkovsky branch of the Agrophysical Research Institute, Leningrad region, Gatchina district)

Год / Year	Температура воздуха, °C / Air temperature, °C						
	месяц и декада / months and decades						
	июнь / june		июль / july			август / august	
	2	3	1	2	3	1	2
2012	16,2	14,5	19,6	16,2	19,5	16,2	14,8
2013	15,4	20,6	18,6	16,8	17,0	19,7	16,4
2014	11,9	11,4	16,8	19,6	22,3	21,7	17,2
2015	14,6	16,5	16,9	13,6	16,1	17,6	14,5
2016	15,4	18,5	16,2	17,2	19,5	16,9	14,9
2017	14,9	12,9	14,2	15,4	17,1	17,0	18,0
2018	17,0	15,8	14,5	21,6	21,2	20,6	16,6
2019	17,8	16,3	14,1	13,9	17,0	14,2	16,9
2020	19,4	19,6	16,6	17,0	15,9	18,2	15,8
2021	18,9	23,0	22,1	22,9	18,5	16,4	16,9
2022	14,5	20,3	19,7	16,2	18,2	17,1	20,2
2023	18,6	19,7	16,2	17,5	16,9	20,9	19,3
Среднее многолетнее / Average long-term	14,8	15,6	16,0	16,9	17,0	16,5	14,9

Мониторинговые исследования посадок осуществляли в период со второй декады июня (появление всходов картофеля) до третьей декады августа (полное отмирание ботвы). Во время визуальных учетов с периодичностью в 7–10 дней на каждой из постоянных площадок фиксировалось наличие и интенсивность повреждения растений, динамика откладки яиц, численность и возрастной состав фитофага. Интенсивность повреждения растений картофеля колорадским жуком оценивали по 9-балльной шкале с нечетным обозначением баллов³: 0 – признак не проявился, 1 – до 5 % листовой поверхности, 3 – 6–25 %, 5 – 26–50 %, 7 – 51–75 %, 9 – более 75 %.

Результаты и их обсуждение. Начало наших исследований пришлось на 2012 г., когда численность колорадского жука в Ленинградской области медленно нарастала после резкого сокращения популяции фитофага, наблюдавшегося в 2007–2009 гг. в результате обильного переувлажнения посадок картофеля в летний и осенний периоды и неблагоприятных условий перезимовки [6]. Заселенность растений личинками насекомого в фазу «цветение» картофеля в 2012 г. составила 1,2 % (8 лич./растение). В условиях 2013 г. колорадский жук в посадках картофеля зернотравяно-пропашного севооборота, используемого в наших стационарных исследованиях, не наблюдался из-за очень поздних сроков посадки культуры (13 июня) и раннего проявления фитофтороза, достигнувшего эпифитотийного развития. В 2014 г. заселенность посадок вредителем медленно нарастала, достигнув максимума в 2015 г., когда она составила 7 % растений при плотности личинок 3,7 экз./растение. В 2016 г. обильные осадки, а в 2017 г. низкие температуры привели к резкому сокращению численности популяции колорадского жука и его отсутствию на протяжении трех последующих лет (2018–2020 гг.).

Такая ситуация сложилась для всей Ленинградской области, в которой местная популяция насекомого сохранялась исключительно в личных подсобных хозяйствах.

Повышенные температуры 2021 г. и наличие резервации вредителя в личных подсобных хозяйствах, находящихся на расстоянии менее 1 км от опытного севооборота, привели к проникновению колорадского жука на производственные посадки картофеля. Заселенность посадок составила 0,14 % растений при плотности личинок разных возрастов 13 экз./растение и выраженной очаговостью при размещении на поле.

В вегетационный период 2022 г. заселенность посадок картофеля зернотравяно-пропашного севооборота увеличилась до 1 % при наличии 15,9 лич./растение. На посадках картофеля соседних севооборотов, располагавшихся рядом с прошлогодними посадками культуры и на незначительном расстоянии от дачных участков, наблюдали более высокую численность вредителя и ярко выраженный краевой эффект заселения. Так, доля растений, поврежденных в средней и сильной степени, составила в среднем на поле 1,5 %, а на 10–11 краевых рядах увеличивалась до 3,4–3,9 % [13].

Массовое размножение колорадского жука на посадках картофеля зернотравяно-пропашного севооборота наблюдали в 2023 г. Заселенность растений взрослыми особями в фазу «всходы» картофеля (16 июня) составила 18,7 %, что в 3 раза превысило экономический порог вредоносности вредителя, равный 5 %⁴. Наличие столь высокого начального потенциала популяции фитофага привело к тому, что уже в фазу «бутонизация» количество поврежденных личинками разных возрастов растений картофеля достигло 68 % при плотности личинок на уровне предыдущих лет (табл. 2).

Таблица 2 – Многолетняя динамика заселенности растений колорадским жуком в посадках картофеля зернотравяно-пропашного севооборота Менковского филиала Агрофизического НИИ в условиях Ленинградской области /
Table 2 – Long-term dynamics of plant colonization by the Colorado potato beetle in potato plantings of grain and grass crop rotation of the Menkovsky branch of the Agrophysical Research Institute in the conditions of the Leningrad region

Показатель / Indicator	2012 г.	2013 г.	2014 г.	2015 г.	2016–2020 гг.	2021 г.	2022 г.	2023 г.
Заселено растений жуками в фазу «цветение», % / The proportion of inhabited plants, %	1,2	0	3,3	7,0	0	0,1	1,0	68,0
Плотность заселения, лич./растение / Colonization density, larvae/plant	8,0	0	10,0	3,7	0	12,8	15,9	13,1

³Зубков А. Ф. Агробиоценологическая фитосанитарная диагностика. СПб., 1995. 386 с.

⁴Экономические пороги вредоносности вредителей, болезней и сорных растений в посевах сельскохозяйственных культур: справочник. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2016. 76 с.

Поврежденность 100 % растений картофеля была зарегистрирована 10 августа. Интенсивность повреждения листового аппарата составила 54 %, при том, что большое количество кустов были обьежены личинками вредителя практически полностью.

Выявленное в период наших исследований восстановление численности популяции

колорадского жука на фоне роста суммы активных температур на 210–320 °С от сред-немноголетней за летний период, пришед-шееся на 2021–2023 гг., совпадает с ситуа-цией в отношении данного вредителя на Северо-Западе РФ и подтверждается обрабатываемыми площадями картофеля (табл. 3)^{5, 6, 7, 8, 9}.

Таблица 3 – Сумма активных температур и площади посадок картофеля на Северо-Западе РФ, обрабатываемых инсектицидами для защиты от колорадского жука /

Table 3 – The sum of the active temperatures and the area of potato plantings in the North-West of the Russian Federation treated with insecticides in protection from the Colorado potato beetle

Показатель / Indicator	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.	2023 г.
Сумма активных температур, °С / The sum of active temperatures, °С	1339	1550	1465	1555	1723	1632	1605
Площадь обработок инсектицидами против колорадского жука, га / The area of insecticide treatments against the Colorado potato beetle, ha	3160	4060	3790	4150	5260	5860	6200

Для успешного развития одного поко-ления колорадского жука в посадках картофеля требуется наличие довольно длительного для Ленинградской области 60-дневного периода с температурой выше 15 °С [11, 14].

Появление перезимовавших имаго коло-радского жука на посадках картофеля, по нашим наблюдениям, совпадает с фазой «полные всходы» во второй декаде июня. Массовому выходу перезимовавших жуков на поверхность почвы благоприятствует температурный режим, превышающий 14–15 °С. Понижение темпе-ратуры ниже 12 °С в этот период, зафиксиро-ванное в условиях вегетации 2014 г., привело к задержке появления насекомого на посадках, а массовое отрождение личинок сдвинулось более чем на 7 дней в сравнении со средне-многолетними датами.

Начало откладки яиц на территории Ленинградской области приходится, как пра-вило, на третью декаду июня. Оптимальными условиями для откладки яиц считаются темпе-ратуры воздуха в диапазоне от 17 до 24 °С.

В период наших исследований соответствие оптимальным требованиям для интенсивной откладки яиц наблюдали только в 2021–2023 гг. Температурный режим оказывал влияние на количество яиц в кладке. Так, если при темпе-ратуре 16,5 °С (2015 г.) зафиксировано в сред-нем 22±10 яйца в кладке, то при 19,7 °С (2023 г.) – 37±14 яиц, варьируя от 6 до 71 шт. в кладке. Частотное распределение количества яиц в одной кладке колорадского жука в вегета-ционный период 2023 г. представлено на рисунке 1.

Особенностью развития колорадского жука в Ленинградской области является низкая выживаемость фитофага в посадках картофеля на ранних этапах онтогенеза. По данным иссле-дований, из 100 отложенных насекомым яиц до стадии личинки III возраста доживает 10,4 % [15]. Соответственно динамика плотности личи-нок в период вегетации имеет в целом нисхо-дящий вид, который наблюдается как при теп-лообеспеченности посадок картофеля типичной для Ленинградской области (2015 г.), так и при ее существенном повышении (2023 г.) (табл. 4).

⁵Обзор фитосанитарного состояния посевов сельскохозяйственных культур в Российской Федерации в 2018 году и про-гноз развития вредных объектов в 2019 году. М.: ФГБУ Россельхозцентр, 2019. 900 с.

URL: <https://rosselhocenter.ru/upload/iblock/a09/vvvg4cjptf73wvc1n62vrcoyh4kvx3j2/2018-2019.pdf>

⁶Обзор фитосанитарного состояния посевов сельскохозяйственных культур в РФ в 2020 году и прогноз развития вредных объектов в 2021 году. М.: ФГБУ Россельхозцентр, 2021. 912 с.

URL: <https://rosselhocenter.ru/upload/iblock/4a0/wwgnb9aohypzcvvarxy2y77xp7z7j1g/2020-2021.pdf>

⁷Обзор фитосанитарного состояния посевов сельскохозяйственных культур в РФ в 2021 году и прогноз развития вредных объектов в 2022 году. М.: ФГБУ Россельхозцентр, 2022. 853 с.

URL: <https://rosselhocenter.ru/upload/iblock/37c/spemt6mlpkp7i05fjeb0t6uc7917i0mc/2021-2022.pdf>

⁸Обзор фитосанитарного состояния посевов сельскохозяйственных культур в РФ в 2022 году и прогноз развития вредных объектов в 2023 году. М.: ФГБУ Россельхозцентр, 2023. 1459 с.

URL: <https://rosselhocenter.ru/upload/iblock/812/ef06ml30nj0tikte594y3hs2nnikdq0o/2022-2023.pdf>

⁹Обзор фитосанитарного состояния посевов сельскохозяйственных культур в РФ в 2023 году и прогноз развития вредных объектов в 2024 году. М.: ФГБУ Россельхозцентр, 2024. 1281 с.

URL: <https://rosselhocenter.ru/upload/iblock/2f5/5k7pj112muj41l16x7itquxc1vlg61ph/2023-2024.pdf>

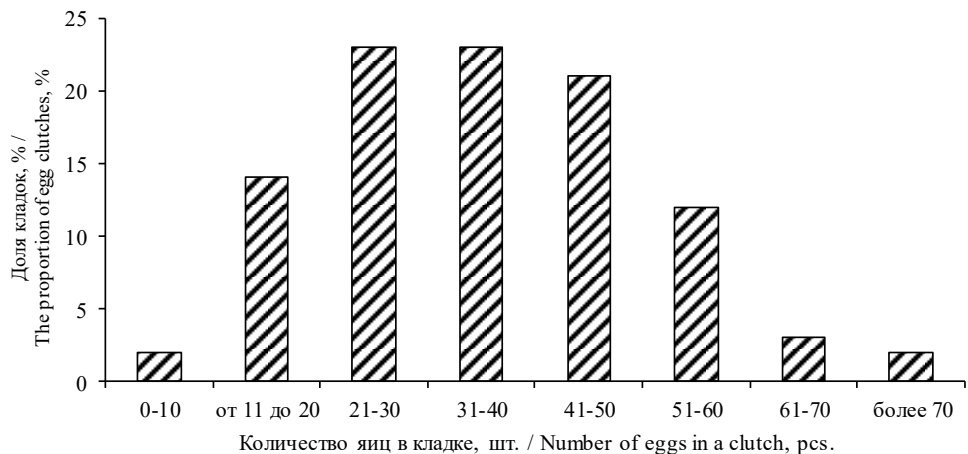


Рис. 1. Частотное распределение количества яиц в 100 кладках колорадского жука на посадках картофеля Менковского филиала Агрофизического НИИ в 2023 г. /

Fig. 1 The frequency distribution of the number of eggs in 100 clutches of the Colorado potato beetle in potato plantings of the Menkovsky branch of the Agrophysical Research Institute in 2023

Таблица 4 – Сезонная динамика численности личинок колорадского жука на посадках картофеля Менковского филиала Агрофизического НИИ в разные по теплообеспеченности годы (повторность – 6-кратная)

Table 4 – Seasonal dynamics of the number of Colorado potato beetle larvae in potato plantings of the Menkovsky branch of the Agrophysical Research Institute in years with different heat availability

2015 г.		2023 г.	
дата учета / date of recording	кол-во личинок, экз./м ² / number of larvae, samples/m ²	дата учета / date of recording	кол-во личинок, экз./м ² / number of larvae, samples/m ²
5.07	15,1±3,35	1.07	8,8±1,95
12.07	7,0±1,11	8.07	13,1±2,66
20.07	5,8±0,72	17.07	8,0±1,72
26.07	3,7±0,42	24.07	6,7±1,28
2.08	3,8±0,57	1.08	2,5±0,62
9.08	3,1±0,60	10.08	0,7±0,18

Вредоносность колорадского жука в значительной степени определяется уровнем заселенности посадок на ранних этапах вегетации культуры. Низкая заселенность посадок жуками (2015 г.) при слабой выживаемости яиц и личинок младших возрастов приводит к невысокой заселенности и поврежденности растений, не достигающей экономического порога вредоносности (ЭПВ) на протяжении всего периода

вегетации картофеля. В ситуации многократного превышения пороговых значений численности перезимовавших особей в фазу «полные всходы» культуры (2023 г.) и последующих благоприятных погодных условий наблюдали стремительное увеличение плотности популяции фитофага и высокий уровень поврежденности растений на заключительных этапах развития культуры (рис. 2).

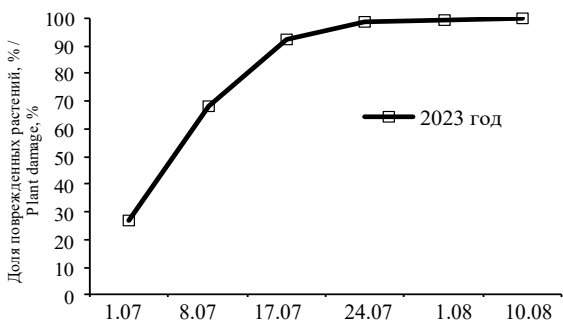
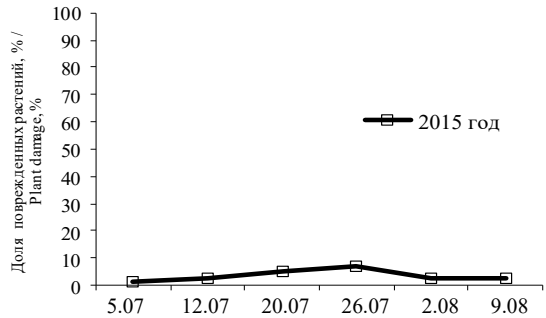


Рис. 2. Динамика поврежденности растений картофеля личинками колорадского жука на посадках картофеля Менковского филиала Агрофизического НИИ в разные по теплообеспеченности годы /

Fig. 2. Dynamics of potato plant damage by Colorado potato beetle larvae in potato plantings of the Menkovsky branch of the Agrophysical Research Institute in different heat supply years

Выводы. 1. По результатам многолетних исследований выявлена зависимость заселенности посадок картофеля колорадским жуком от уровня теплообеспеченности периода активной вегетации культуры. Благоприятные погодные условия для развития колорадского жука в течение 2021-2022 гг. способствовали достижению вредителем на момент вегетации 2023 г. ощутимого вредоносного уровня (100 % поврежденных растений при интенсивности повреждения 54 % листового аппарата).

2. Определено комплексное влияние режима пониженных температур второй и

третьей декады июня на сроки начала массового отрождения личинок колорадского жука (запаздывание более чем на 7 дней) и среднего количества яиц в кладке (уменьшение в 1,7 раза) в сравнении с оптимальным уровнем температуры в начальные фазы онтогенеза насекомого.

3. В связи с низкой выживаемостью личинок младших возрастов высокий уровень вредоносности колорадского жука на посадках картофеля Ленинградской области наблюдается лишь при многократном превышении ЭПВ вредителя на ранних этапах вегетации культуры.

Список литературы

1. Мацишина Н. В. Развитие колорадского жука в зависимости от температуры и фотопериода. Защита и карантин растений. 2014;(11):49–50. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22400446> EDN: SWEXOD
2. Слобожанина Е. А. Роль температурного фактора в онтогенезе колорадского жука (*Leptinotarsa decemlineata*) в условиях Курганской области. Вестник Курганской ГСХА. 2018;(2(26)):66–67.
3. Шорохов М. Н., Кривченко О. А., Долженко О. В. Новые комбинированные препараты для защиты картофеля от колорадского жука. Агрохимия. 2023;(2):48–53. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002188122120122> EDN: SPWZGY
4. Коваль А. Г., Гусева О. Г. Изменение комплекса насекомых-фитофагов как следствие потепления климата. Защита и карантин растений. 2008;(1):42–43. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=13794532> EDN: LPWNDF
5. Гричанов И. Я., Якуткин В. И., Овсянникова Е. И., Саулич М. И. Карты распространения и зон вредоносности вредителей и болезней картофеля и подсолнечника. Санкт-Петербург: ВИЗР, 2017. 63 с. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28793135> EDN: YGCBYR
6. Фасулати С. Р., Иванова О. В. Роль абиотических факторов в ограничении распространения колорадского жука на Северо-Западе России. Вестник защиты растений. 2018;(4(98)):27–30. DOI: [https://doi.org/10.31993/2308-6459-2018-4\(98\)-27-30](https://doi.org/10.31993/2308-6459-2018-4(98)-27-30) EDN: VUUTAB
7. Хохлов Г. Н., Жарина Н. Л., Гусева О. Г., Марченко Е. В., Вяземская Е. О. Видовой состав жесткокрылых насекомых на полях севооборота Меньковского стационара в Ленинградской области. Меньковский агроэкологический стационар. СПб: ВИЗР, 2006. С. 23–26.
8. Наумова Н. И., Фасулати С. Р. Факторы, определившие расселение колорадского жука на посадках картофеля в Северо-Западном регионе России. Вестник защиты растений. 2014;(4):32–35.
9. Субикина Н. С., Никитин П. И. Фитосанитарная ситуация в северо-восточном крае Ленинградской области. Л., 2006. 63 с.
10. Наумова Н. И. Влияние условий зимовки на расселение колорадского жука при его территориальной экспансии в Северо-Западном регионе России. Вестник защиты растений. 2015;(1(83)):45–48.
11. Ушатинская Р. С. Колорадский картофельный жук (*Leptinotarsa decemlineata* Say). М.: Наука, 1981. 375 с. Режим доступа: <https://studylib.ru>
12. Зубков А. Ф. Методические указания по сбору полевой биологической информации с целью оценки вредоносности комплекса вредных организмов. Л., 1978. 18 с.
13. Смук В. В., Шпанев А. М. Особенности пространственного размещения колорадского жука на посадках картофеля. Агрофизика. 2023;(2):21–29. DOI: <https://doi.org/10.25695/AGRPH.2023.02.04> EDN: SNLRXP
14. Фасулати С. Р., Иванова О. В. Изменчивость биологических показателей развития колорадского жука при оценке устойчивости пасленовых культур к вредителю в различных экологических условиях. Вестник защиты растений. 2018;(3(97)):43–48. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36288781> EDN: YLHLAT
15. Гусева О. Г. Выживаемость колорадского жука (*Leptinotarsa decemlineata* Say) в летний период в условиях Ленинградской области. Вестник защиты растений. 2004;(3):25–32.

References

1. Matsishina N. V. Development of the colorado beetle depending on temperature and the photoperiod. *Zashchita i karantin rasteniy*. 2014;(11):49–50. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22400446>
2. Slobozhanina E. A. The role of the temperature factor in the ontogenesis of colorado potato beetle (*Leptinotarsa decemlineata*) in the conditions of Kurgan region. *Vestnik Kurganskoy GSKhA*. 2018;(2(26)):66–67. (In Russ.).

3. Shorokhov M. N., Krivchenko O. A., Dolzhenko O. V. New combined preparations to protect potatoes from the colorado potato beetle. *Agrokhimiya*. 2023;(2):48–53. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002188122120122>
4. Koval' A. G., Guseva O. G. Changes in the insect-phytophagous complex as a result of climate warming. *Zashchita i karantin rasteniy*. 2008;(1):42–43. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=13794532>
5. Grichanov I. Ya., Yakutkin V. I., Ovsyannikova E. I., Saulich M. I. Maps of areas and zones of harmfulness of potato and sunflower pests and diseases. Saint-Petersburg: *VIZR*, 2017. 63 p. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28793135>
6. Fasulati S. R., Ivanova O. V. Role of environmental abiotic factors in limiting the colorado potato beetle distribution in Northwestern Russia. *Vestnik zashchity rasteniy* = Plant Protection News. 2018;(4(98)):27–30. (In Russ.). DOI: [https://doi.org/10.31993/2308-6459-2018-4\(98\)-27-30](https://doi.org/10.31993/2308-6459-2018-4(98)-27-30)
7. Khokhlov G. N., Zharina N. L., Guseva O. G., Marchenko E. V., Vya-zemskaya E. O. The species composition of coleoptera insects in the crop rotation fields of the Minkovsky study area in the Leningrad region. Menkovsky Agroecological Hospital. Saint-Petersburg: *VIZR*, 2006. pp. 23–26.
8. Naumova N. I., Fasulati S. R. Decisive factors of the colorado beetle spread on potato fields in the North-west region of Russia. *Vestnik zashchity rasteniy* = Plant Protection News. 2014;(4):32–35. (In Russ.).
9. Subikina N. S., Nikitin P. I. Phytosanitary situation in the north-eastern region of the Leningrad region. Leningrad, 2006. 63 p.
10. Naumova N. I. The influence of wintering conditions on the expansion of colorado potato beetle in the North-western Russia. *Vestnik zashchity rasteniy* = Plant Protection News. 2015;(1(83)):45–48. (In Russ.).
11. Ushatinskaya R. S. Colorado potato beetle (*Leptinotarsa decemlineata* Say). Moscow: Nauka, 1981. 375 p. URL: <https://studylib.ru>
12. Zubkov A. F. Methodological guidelines for the collection of field biocenological information in order to assess the harmfulness of a complex of harmful organisms. Leningrad, 1978. 18 p.
13. Smuk V. V., Shpanev A. M. Features of colorado potato beetle spatial placement in potato plantings. *Agrofizika* = Agrophysica. 2023;(2):21–29. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.25695/AGRPH.2023.02.04>
14. Fasulati S. R., Ivanova O. V. Variability of biological parameters of colorado potato beetle development at evaluation of solanaceous cultivars for resistance in different ecological conditions. *Vestnik zashchity rasteniy* = Plant Protection News. 2018;(3(97)):43–48. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36288781>
15. Guseva O. G. Survival rate of the Colorado potato beetle (*Leptinotarsa decemlineata* Say) in the summer period in the conditions of the Leningrad region. *Vestnik zashchity rasteniy* = Plant Protection News. 2004;(3):25–32. (In Russ.).

Сведения об авторе

✉ **Смук Василий Васильевич**, кандидат с.-х. наук, старший научный сотрудник лаборатории опытного дела, ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт», Гражданский проспект, д. 14, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, 195220, e-mail: office@agrophys.ru; научный сотрудник лаборатории интегрированной защиты растений, ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений», шоссе Подбельского, д. 3, г. Санкт-Петербург, Пушкин, Российская Федерация, 196608, e-mail: info@vizr.spb.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4763-9082>, e-mail: vvsmuk@mail.ru

Information about the author

✉ **Vasiliy V. Smuk**, PhD in Agricultural Science, senior researcher, the Laboratory of Experimental Work, Agrophysical Research Institute, Grazhdansky pr., 14, Saint-Petersburg, Russian Federation, 195220, e-mail: office@agrophys.ru; researcher at the Laboratory of Integrated Plant Protection, All-Russian Institute of Plant Protection, Podbelskogo, 3, Saint-Petersburg, Pushkin, Russian Federation, 196608, e-mail: info@vizr.spb.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4763-9082>, e-mail: vvsmuk@mail.ru

✉ – Для контактов / Corresponding author

ХРАНЕНИЕ И ПЕРЕРАБОТКА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ / STORAGE AND PROCESSING OF AGRICULTURAL PRODUCTION

<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.3.415-424>
УДК 637.071



Экспериментальные исследования безопасности пантогематогена в качестве функционального ингредиента специализированных продуктов: аллергенные и иммунотоксические свойства

© 2024. Г. А. Дорн¹, Е. Ю. Лобач², Ю. Г. Гурьянов¹, Б. Тохириён³✉, В. М. Позняковский^{3,4}

¹ФГБОУ ВО «Государственный аграрный университет Северного Зауралья», г. Тюмень, Российская Федерация,

²ФГБОУ ВО «Сочинский государственный университет», г. Сочи, Российская Федерация,

³ФГБОУ ВО «Уральский государственный экономический университет», г. Екатеринбург, Российская Федерация,

⁴ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный медицинский университет Министерства здравоохранения Российской Федерации», г. Кемерово, Российская Федерация

Цель настоящего исследования – изучение аллергенных и иммунотоксических свойств пантогематогена, получаемого из крови самок горноалтайского марала, в качестве функционального ингредиента специализированных продуктов. Оценку аллергенных и иммунотоксических свойств проводили в 2020–2022 гг. путем внутрижелудочного введения пантогематогена 395 мышам линии СВА массой 15–18 г, получавших препарат в терапевтической дозе 50 мг/кг и максимальной разовой – 500 мг/кг. Определяли сенсибилизацию организма животных после курса введения пантогематогена по дерегуляции тучных клеток. Установлено, что при использовании максимальной разовой дозы реакция дегрануляции не превышало 0,2. Необходимо подчеркнуть, что изменений коэффициента лизиса лейкоцитов у мышей, получавших различные дозы пантогематогена, не зарегистрировано. Также показано влияние пантогематогена на массу и клеточность иммунокомпетентных органов животных. Отмечено, что даже использование дозы (500 мг/кг), превышающей терапевтическую в 10 раз, не оказывает влияния на клеточность иммунокомпетентных органов. В целом материалы экспериментальных исследований свидетельствуют об отсутствии аллергенных и иммунотоксических свойств испытуемого пантогематогена в качестве функционального ингредиента при разработке специализированных продуктов с заданными лечебно-профилактическими свойствами.

Ключевые слова: продукты пантового оленеводства, БАД, коррекция питания, функциональная направленность, гигиеническая экспертиза, экспериментальные данные, эффективность, безопасность

Благодарности: работа выполнена без финансового обеспечения в рамках инициативной тематики. Исследование проводили под руководством профессора, доктора медицинских наук Г. М. Ратнера на базе Научно-исследовательского института фармакологии и регенеративной медицины имени Е. Д. Гольдберга (структурное подразделение ФГБНУ «Томский национальный исследовательский медицинский центр Российской академии наук»).

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Дорн Г. А., Лобач Е. Ю., Гурьянов Ю. Г., Тохириён Б., Позняковский В. М. Экспериментальные исследования безопасности пантогематогена в качестве функционального ингредиента специализированных продуктов: аллергенные и иммунотоксические свойства. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2024;25(3):415–424.

DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.3.415-424>

Поступила: 04.03.2024

Принята к публикации: 30.05.2024

Опубликована онлайн: 26.06.2024

Experimental studies of the safety of pantohepatogen as a functional ingredient in specialized products: allergenic and immunotoxic properties

© 2024. Galina A. Dorn¹, Evgenia Y. Lobach², Yuri G. Guryanov¹, Boisjoni Tohiriyon³✉, Valery M. Poznyakovsky^{3,4}

¹Northern Trans-Ural State Agricultural University, Tyumen, Russian Federation,

²Sochi State University, Sochi, Russian Federation,

³Ural State University of Economics, Ekaterinburg, Russian Federation,

⁴Kemerovo State Medical University of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Kemerovo, Russian Federation

The purpose of the research is to study the allergenic and immunotoxic properties of pantohepatogen obtained from the blood of female Gorno-Altai maral deer as a functional ingredient of specialized products. Allergenic and immunotoxic properties were assessed in 2020–2022 by intragastric administration of pantohepatogen to 395 CBA mice weighing 15–18 g, who received the drug at a therapeutic dose of 50 mg/kg and a maximum single dose of 500 mg/kg. The sensitization of the animal body after a course of administration of pantohepatogen was determined by deregulation of mast cells. It has been established that when using the maximum single dose, the degranulation reaction does not exceed 0.2. It is necessary to emphasize that no changes in the leukocyte lysis coefficient were recorded in mice receiving different doses of pantohepatogen. The effect of pantohepatogen on the mass and cellularity of the immunocompetent organs of animals is also shown. It was noted that even the use of a dose (500 mg/kg) 10 times higher than the therapeutic dose does not affect the cellularity of immunocompetent organs. In general, the materials of experimental studies indicate the absence of allergenic and immunotoxic properties of the tested pantohepatogen as a functional ingredient in the development of specialized products with specified therapeutic and prophylactic properties.

Key words: antler reindeer herding products, dietary supplements, nutrition correction, functional orientation, hygienic examination, experimental data, effectiveness, safety

Acknowledgments: the work was carried out without financial support within the framework of the initiative topic. The study was conducted at the Research Institute of Pharmacology and Regenerative Medicine named after E. D. Goldberg Federal State Budgetary Scientific Institution «Tomsk National Research Medical Center of the Russian Academy of Sciences» under the guidance of Professor, Doctor of Medical Sciences G. M. Ratner.

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

Conflict of interest: the authors declares that there is no conflict of interest.

For citation: Dorn G. A., Lobach E. Y., Guryanov Yu. G., Tohiriyon B., Poznyakovsky V. M. Experimental studies of the safety of pantohepatogen as a functional ingredient in specialized products: allergenic and immunotoxic properties. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2024;25(3):415–424. (In Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.3.415-424>

Received: 04.03.2024 Accepted for publication: 30.05.2024 Published online: 26.06.2024

Философия питания современного человека неизбежно связана с обеспечением здорового образа жизни. Вклад питания в сохранение здоровья и работоспособности составляет, по заключению экспертов ВОЗ, около 70 % от суммы других учитываемых факторов (физическая активность; генетика; вредные привычки, режим труда, отдыха и др.) [1, 2, 3, 4].

Природные биологически активные комплексы в виде БАД, других специализированных продуктов всё чаще используются для коррекции питания и здоровья современного человека, учитывая их «мягкое», пролонгированное и, вместе с тем, эффективное воздействие на обменные процессы [5, 6, 7].

На протяжении многих веков медицина использует природные средства для оздоровления и восстановления [8, 9, 10]. При этом широко применяются не только специализированные продукты растительного проис-

хождения, но и животное сырьё. Среди них особое место занимают продукты пантового оленеводства [11, 12, 13].

Продукция пантового оленеводства улучшает состояние иммунной системы, в первую очередь её клеточного звена, которое имеет большое значение в противовирусной и противоопухолевой защите организма. При применении пантовых препаратов отмечено снижение концентрации циркулирующих иммунных комплексов, что может иметь значение для больных аутоиммунными заболеваниями [14, 15, 16].

Продукция пантового оленеводства активно используется в производстве специализированных продуктов в качестве природных адаптогенов [17, 18, 19].

Одним из таких продуктов является пантогематоген, получаемый из крови самок горно-алтайского марала (взятый в конечный период роста пантов, до начала их окостенения).

В этой связи представляется важным иметь доказательные исследования его безопасности.

Цель исследования – изучить аллергенные и иммунотоксические свойства пантогематогена, получаемого из крови самок горноалтайского марала, в качестве функционального ингредиента специализированных продуктов питания.

Научная новизна – получены новые экспериментальные данные об отсутствии аллергенных и иммунотоксических свойств пантогематогена путем внутрижелудочного введения испытательной дозы мышам линии СВА, показана возможность применения пантогематогена в качестве нового функционального ингредиента при разработке специализированных продуктов с заданными лечебно-профилактическими свойствами.

Материал и методы. Работа выполнена в период 2020–2022 гг. на базе Научно-исследовательского института фармакологии и регенеративной медицины имени Е. Д. Гольдберга (структурное подразделение ФГБНУ «Томский национальный исследовательский медицинский центр Российской академии наук»). Аллергенные и иммунотоксические свойства пантогематогена оценивали согласно методическим рекомендациям¹ на 395 мышах линии СВА массой 15–18 г.

Для характеристики аллергенных свойств пантогематогена, помимо регламентированной реакции дегрануляции тучных клеток, использована реакция лейкоцитолита *in vitro*, которая проста в постановке, хорошо воспроизводима и достаточно объективна по учету результатов. С целью определения типа возможных аллергических реакций изучали способность пантогематогена индуцировать гиперчувствительность немедленного (ГНТ) и замедленного (ГЗТ) типов, для чего применяли кожные аппликационные пробы, проводимые без скарификации кожных покровов. Известно, что специфичность этих проб не уступает скарификационным и внутрикожным тестам, но исключает занос инфекции и возникновение неспецифических воспалительных реакций.

Иммунотоксические свойства пантогематогена изучали путем постановки следующих тестов: реакции ТЗТ, индуцированной эритроцитами барана (ЭБ), дающей интеграль-

ную характеристику эффекторных клеточных реакций иммунной системы. Для оценки изменений под влиянием пантогематогена в гуморальном звене иммунного ответа, при иммунизации тимусзависимым антигеном – ЭБ, использовали метод подсчета антителообразующих клеток (АОК) в селезенке и исследование динамики накопления антител в сыворотке крови с применением реакции гемагглютинации (РГА). Изучено влияние пантогематогена на массу и клеточность иммунокомпетентных органов, а также активность фагоцитов.

Оценка аллергенных свойств пантогематогена. При постановке данных тестов пантогематоген вводили животным внутрижелудочно в течение 30 дней в двух дозировках: 1-я опытная группа – 50 мг/кг (терапевтическая доза), 2-я группа – 500 мг/кг (доза, превышающая терапевтическую в 10 раз) ежедневно в объеме 0,2 мл. Раствор пантогематогена в дистиллированной воде готовили *ex tempore*. Параллельно контрольным мышам аналогично вводился растворитель (дистиллированная вода).

Непрямая реакция дегрануляции тучных клеток. Сенсибилизацию организма определяли на 10-е, 20-е и 30-е сутки после начала курса введения пантогематогена по дегрануляции тучных клеток, получаемых из перитонеального экссудата интактных мышей линии СВА: на предметом стекле, предварительно окрашенном 0,3%-ным спиртовым раствором нейтрального красного и высушенном при комнатной температуре, соединяли равные объемы (по 30 мкл) взвеси тучных клеток, сыворотки крови опытных (или контрольных) животных и исследуемого пантогематогена, суспензированного в растворе Хенкса (концентрация – 8 мг/0,2 мл), что соответствовало максимальной разовой дозе. В предварительных опытах установлено, что при использовании этой дозы реакция дегрануляции не превышает 5 %. Смесь под покровным стеклом инкубировали 15 мин при 37 °С. Аналогичным образом готовили контрольные препараты: контроль 1 – тучные клетки интактных мышей; контроль 2 – тучные клетки + исследуемый пантогематоген; контроль 3 – тучные клетки + сыворотка крови соответствующей группы опытных мышей.

¹Руководство по проведению доклинических исследований лекарственных средств. М.: Гриф и К, 2012. 944 с.; Методические рекомендации по оценке аллергенных свойств фармакологических средств. М., 1988. 163 с.; Методические рекомендации по оценке иммунотоксических свойств фармакологических средств. М., 1991. 248 с.

Оценку результатов проводили путем подсчета показателя дегрануляции тучных клеток (ПДТК) по формуле:

$$\text{ПДТК} = \frac{1a + 2b + 3c + 3d}{100}, \quad (1)$$

где: a, b, c, d – количество дегранулированных клеток соответственно степени дегрануляции (слабо выраженная, умеренная, резкая и полная). Реакция считается положительной, если значение ПДТК превышает 0,2.

Реакцию лейкоцитоллиза *in vitro* ставили на 10-е, 20-е и 30-е сутки после начала курса введения пантогематогена следующим образом: к 0,1 мл гепаринизированной крови мышей добавляли равный объем исследуемого пантогематогена, суспензированного в физиологическом растворе (концентрация – 8 мг/0,2 мл, что соответствовало максимальной разовой дозе), или физиологического раствора (контроль). После 90-минутной инкубации в термостате при 37 °С подсчитывали количество лейкоцитов в опытных и контрольных пробах. Коэффициент лизиса лейкоцитов (КЛЛ) вычисляли по формуле:

$$\text{КЛЛ} = \text{О/К}, \quad (2)$$

где О – число лейкоцитов в опытной пробе, К – число лейкоцитов в контрольной пробе. Реакция считается положительной при значениях КЛЛ <1,0.

Кожные аппликационные пробы ставили следующим образом. Мышей фиксировали мягкими вязками в положении на спине, шерсть в области живота выстригали, кожу дезинфицировали 70%-ным этиловым спиртом. На поверхность кожи наносили суспензированный в дистиллированной воде пантогематоген в разрешающих дозах – 0,8 или 8 мг/0,2 мл соответственно для I и II опытных групп, в контрольной группе изучали выраженность реакции на обе дозы. Реакцию учитывали через 20 мин (оценка ГНТ) и 24 ч (оценка ГЗТ).

При постановке кожных аппликационных проб на 10-е, 20-е и 30-е сутки после начала курса введения пантогематогена реакций ГНТ и ГЗТ не наблюдали ни в опытных, ни в контрольной группах.

Влияние пантогематогена на интенсивность реакции ГЗТ. Реакцию воспроизводили следующим образом: мышей одновременно с 6-й инъекцией исследуемого пантогематогена (или дистиллированной воды – для контрольной

группы) иммунизировали способом однократного внутрибрюшинного введения ЭБ в дозе 2×10^7 клеток, суспензированных в 0,2 мл физиологического раствора. Разрешающую инъекцию проводили на 5-е сутки после иммунизации (через 1 сутки после окончания 10-дневного курса введения пантогематогена) путем инъекции ЭБ (1×10^8 эритроцитов в 20 мкл физиологического раствора) в подушечку задней лапы. В контралатеральную лапу параллельно вводили данный раствор в том же объеме. Интенсивность реакции изучали через 24 ч по индексу реакции (IR), который вычисляли индивидуально для каждого животного по формуле:

$$\text{IR} = (\text{M}_o - \text{M}_k) / \text{M}_k \times 100 \%, \quad (3)$$

где M_o – масса опытной лапы,

M_k – масса контрольной лапы.

Влияние пантогематогена на формирование АОК. Иммунизацию подопытных и контрольных мышей проводили путем однократной внутрибрюшинной инъекции 0,3 мл 10%-ной взвеси ЭБ по 2 схемам:

I – антиген вводили на 6-е сутки после начала курса пантогематогена;

II – иммунизацию осуществляли на следующий день после окончания курса.

Количество антителообразующих клеток (АТОК) в селезенке мышей определяли по методу Cunningham² на 4-е сутки после иммунизации.

Селезенки опытных и контрольных мышей гомогенизировали и подсчитывали клеточность органов. Ингредиенты реакции (спленоциты, комплемент, ЭБ) инкубировали в камере на предметном стекле в течение 45 мин при 37 °С. Подсчет АОК проводили на 500 кардиоцитов селезенки. Полученные результаты пересчитывали на общее количество кардиоцитов органа и выражали в процентах.

Влияние пантогематогена на титр гемогглютининов в сыворотке крови. Схемы эксперимента при изучении данного показателя аналогичны предыдущим. Титр антител к ЭБ определяли на 7-е и 14-е сутки после иммунизации в стандартной реакции гемогглютинации.

Изотип антител выявляли с помощью 0,1 М раствора 2-меркаптоэтанола (2-МЭ), IgM-антитела чувствительны к воздействию 2-МЭ, т. е. теряют активность после обработки указанным реагентом, IgG-антитела резистентны к такому воздействию. Полученные данные выражали в двоичных логарифмах титра.

²Tuzun E., Berrih-Aknin S., Brenner T., Kusner L. L., Le Panse R., Yang H., Tzartos S., Christadoss P. Guidelines for standard preclinical experiments in the mouse model of myasthenia gravis induced by acetylcholine receptor immunization. *Experimental Neurology*. 2015;270:11–17. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.expneurol.2015.02.009>

Действие пантогематогена на фагоцитарную активность перитонеальных макрофагов. Использованный для оценки этого показателя метод основан на определении оптической плотности (ОП) лидирующего раствора после разрушения фагоцитов, поглотивших частицы нейтрального красного. Подопытных и контрольных мышей забивали путем мануальной дислокации шейных позвонков, асептически освобождали брюшину и вводили внутрибрюшинно по 5 мл раствора Хенкса.

Полученные результаты обрабатывали статистически. Нормальность распределения проверяли с помощью критерия Шапиро-Уилкса³. Дальнейшая статистическая обработка результатов осуществлялась с использованием t-критерия Стьюдента.

Результаты и их обсуждение. Как видно из представленных в таблице 1 результатов,

пантогематоген не вызывал выраженных изменений ПДТК по сравнению с контролем, лишь на 10-е сутки после начала курса введения испытуемого пантогематогена в дозе, превышающей терапевтическую в 10 раз, отмечено статистически значимое снижение ПДТК. Необходимо подчеркнуть, что ни в контрольной, ни в опытных группах (независимо от использованных доз и сроков исследования) реакция не могла считаться положительной, поскольку абсолютные величины ПДТК не превышали 0,2.

Результаты исследований реакции лейкоцитоллиза у мышей, получавших разные дозы пантогематогена показаны в таблице 2. Достоверных по сравнению с контролем изменений коэффициента лизиса лейкоцитов у опытных групп мышей не отмечено.

Таблица 1 – Показатель реакции дегрануляции тучных клеток у мышей, получавших разные дозы пантогематогена /

Table 1 – Indicator of mast cell degranulation reaction in mice receiving different doses of pantohepatogen

Срок исследования / Duration of the study	Доза пантогематогена / Pantohepatogen dose		Контроль / Control (n = 15)
	50 мг/кг (n = 20)	500 мг/кг (n = 20)	
10-е сутки / 10th day	0,058±0,01	0,043±0,00*	0,072±0,01
20-е сутки / 20th day	0,058±0,01	0,040±0,01	0,055±0,01
30-е сутки / 30th day	0,053±0,01	0,045±0,01	0,040±0,01

* Различия между опытной и контрольной группами достоверны (p = 0,002, метод оценки – t-критерий Стьюдента /

* Differences between the experimental and control groups are significant (p = 0.002, Evaluation method – Students t-test)

Таблица 2 – Реакция лейкоцитоллиза у мышей, получавших разные дозы пантогематогена /

Table 2 – Leukocytolysis reaction in mice receiving different doses of pantohepatogen

Срок исследования / Duration of the study	Доза пантогематогена / Pantohepatogen dose		Контроль / Control (n = 15)
	50 мг/кг (n = 20)	500 мг/кг (n = 20)	
10-е сутки / 10th day	1,077±0,10	0,873±0,04	0,862±0,04
20-е сутки / 20th day	1,130±0,10	1,050±0,07	0,903±0,06
30-е сутки / 30th day	1,390±0,16	1,273±0,36	1,188±0,07

Проведена оценка иммуотоксических свойств пантогематогена. Влияние пантогематогена на массу и клеточность иммуокомпетентных органов (костного мозга, тимуса, селезенки, подколенного лимфатического узла) изучали общепринятыми методами через 24 часа после окончания 10-дневного курса введения пантогематогена. Полученные данные представлены в таблице 3, из которой следует, что

применение высокой дозы пантогематогена (500 мг/кг) указанным курсом приводит к существенному по сравнению с контролем снижению массы и клеточности селезенки, на массу и клеточность остальных иммуокомпетентных органов введение пантогематогена в испытательных дозах влияния не оказывает.

Изучено влияние пантогематогена на интенсивность реакции ГЗТ (табл. 4).

³Alizadeh N. H. Two powerful tests for normality. Annals of Data Science. 2016;3:225–234.

URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40745-016-0083-y>

Таблица 3 – Влияние пантогематогена на массу и клеточность иммунокомпетентных органов мышей, получавших разные дозы препарата /

Table 3 – Effect of pantohematogen on the mass and cellularity of immunocompetent organs of mice receiving different doses of the drug

Наименование органа / Name of the body	Показатель / Indicator	50 мг/кг x 10 дней / 50 mg/kg x 10 days (n = 20)	500 мг/кг x 10 дней / 500 mg/kg x 10 days (n = 20)	Контроль / Control (n = 15)
Костный мозг / Bone marrow	Клеточность / Cellularity	18,12±0,93	19,21±0,34	17,25±0,86
Тимус / Thymus	Масса / Weight	41,67±4,56	35,67±2,73	32,67±2,37
	Клеточность / Cellularity	115,83±19,33	101,72±12,80	83,12±8,89
Селезенка / Spleen	Масса / Weight	80,17±1,19	70,67±4,11**	80,83±1,83
	Клеточность / Cellularity	137,67±6,29	117,50±7,07*	151,00±4,13
Подколенный лимфоузел / Popliteal lymph node	Масса / Weight	3,67±0,33	3,17±0,21	3,58±0,52
	Клеточность / Cellularity	2,96±0,30	3,17±0,35	3,33±0,33

Примечание: различия между опытной и контрольной группами достоверны (*p = 0,002; ** p < 0,05, метод оценки – t-критерий Стьюдента) /

Note: the differences between the experimental and control groups are significant (*p = 0.002; ** p < 0.05, Evaluation method – Students t-test)

Таблица 4 – Влияние пантогематогена на интенсивность реакции ГЗТ у мышей, получавших разные дозы препарата /

Table 4 – Effect of pantohematogen on the intensity of the HRT reaction in mice receiving different doses of the drug

Доза пантогематогена / Pantohematogen dose	Индекс реакции, % / Reaction Index, %
В течение 10 дней – дозировка 50 мг/кг / For 10 days – dosage of 50 mg/kg (n = 20)	18,87±3,00
В течение 10 дней – дозировка 500 мг/кг / For 10 days – dosage of 500 mg/kg (n = 20)	21,37±5,16
Контроль / Control (n = 15)	27,71±5,14

Из приведенных в таблице 4 данных можно сделать вывод, что в обеих подопытных группах отмечена тенденция к снижению интенсивности реакции гиперчувствительности замедленного типа в результате введения пантогематогена, однако из-за большого разброса индивидуальных показателей достоверных изменений индекса реакции ГЗТ по сравнению с контролем не выявлено.

Проведена оценка влияния пантогематогена на формирование АОК. Данные эксперимента сведены в таблицу 5.

Анализ представленных результатов показывает, что курсовое введение пантогематогена в выбранных дозах оказывает стимулирующее влияние на формирование АОК в селезенке мышей обеих подопытных групп, причем при I схеме иммунизации (инъекция ЭБ в середине курса введения испытуемого пантогематогена) существенное повышение относительного и абсолютного содержания АОК регистрировали только у мышей, получавших высокие дозы пантогематогена (500 мг/кг).

В случае применения II схемы иммунизации (введение антигена через 1 сутки после окончания курса пантогематогена) тенденцию к увеличению данного показателя наблюдали в обеих группах, однако статистически значимым было только у мышей, получавших пантогематоген в терапевтической дозе (50 мг/кг).

Проведен эксперимент по влиянию пантогематогена на титр гемагглютининов в сыворотке крови, результаты которого показали, что, несмотря на некоторую стимуляцию образования АОК в селезенке мышей, проиммунизированных эритроцитами барана на фоне введения пантогематогена, существенное по сравнению с контролем повышение титров антител в сыворотке крови регистрируется только на 7-е сутки после иммунизации животных, получавших полный курс высоких доз (500 мг/кг) пантогематогена (II схема опытов) (табл. 6). В остальных случаях значительного и постоянного усиления гуморального иммунного ответа не наблюдали. Отмечено статистически достоверное снижение содержания гема-

гглютининов в крови при применении больших доз пантогематогена и I схемы иммунизации (на 7-е сутки после инъекции антигена – за счет антител класса IgG, на 14-е – за счет

IgM-гемагглютининов), через 14 суток после иммунизации по II схеме у мышей, получавших терапевтическую (50 мг/кг) дозу пантогематогена.

Таблица 5 – Влияние пантогематогена на содержание кариоцитов и антителообразующих клеток в селезенке мышей, получавших разные дозы препарата /
Table 5 – Effect of panto hematogen on the content of karyocytes and antibody-forming cells in the spleen of mice receiving different doses of the drug

Доза пантогематогена / Pantohematogen dose	Показатель / Indicator		
	число кариоцитов ($\times 10^6$) / number of karyocytes ($\times 10^6$)	процент АОК / AOK percentage	абсолютное число АОК ($\times 10^6$) / absolute number of AOK ($\times 10^6$)
I схема иммунизации / I immunization scheme			
В течение 10 дней – 50 мг/кг / For 10 days – 50 mg/kg	177,81 \pm 4,59	5,67 \pm 0,29	10,04 \pm 0,58
В течение 10 дней – 500 мг/кг / For 10 days – 500 mg/kg	205,70 \pm 5,25	8,47 \pm 0,28*	17,48 \pm 0,85*
Контроль / Control	198,12 \pm 10,10	5,83 \pm 0,33	11,58 \pm 0,91
* Различия между опытной и контрольной группами достоверны (p = 0,001) / * Differences between the experimental and control groups are significant (p = 0.001)			
II схема иммунизации / II immunization scheme			
В течение 10 дней – 50 мг/кг / For 10 days – 50 mg/kg	166,17 \pm 11,75	3,97 \pm 0,25*	6,58 \pm 0,57**
В течение 10 дней – 500 мг/кг / For 10 days – 500 mg/kg	159,60 \pm 9,03	3,37 \pm 0,30	5,48 \pm 0,68
Контроль / Control	161,00 \pm 10,74	2,97 \pm 0,22	4,72 \pm 0,37

Примечание: различия между опытной и контрольной группами достоверны (*p = 0,002; ** p <0,05, метод оценки – t-критерий Стьюдента) /
Note: the differences between the experimental and control groups are significant (*p = 0.002; ** p <0.05, Evaluation method – Students t-test)

Таблица 6 – Влияние пантогематогена на уровень гемагглютининов в сыворотке крови мышей, получавших разные дозы препарата /
Table 6 – Effect of panto hematogen on the level of hemagglutinins in the blood serum of mice receiving different doses of the drug

Доза пантогематогена / Pantohematogen doses	Суммарный tитр АТ / Total titer AT		Tитр IgM-АТ / IgM-AT titer		Tитр IgG-АТ / IgG-AT titer	
	7 сутки / 7 days	14 сутки / 14 days	7 сутки / 7 days	14 сутки / 14 days	7 сутки / 7 days	14 сутки / 14 days
I схема иммунизации / I immunization scheme						
В течение 10 дней – 50 мг/кг / For 10 days – 50 mg/kg	8,54 \pm 0,82	9,48 \pm 0,47	0,00 \pm 0,00	0,51 \pm 0,33	8,53 \pm 0,82	8,99 \pm 0,20
В течение 10 дней – 500 мг/кг / For 10 days – 500 mg/kg	8,32 \pm 0,37*	8,49 \pm 0,31	0,00 \pm 0,00	0,00 \pm 0,00*	8,32 \pm 0,37*	8,49 \pm 0,31
Контроль / Control	9,49 \pm 0,31	8,99 \pm 0,21	0,33 \pm 0,21	0,50 \pm 0,22	9,19 \pm 0,17	8,49 \pm 0,31
II схема иммунизации / II immunization scheme						
В течение 10 дней – 50 мг/кг / For 10 days – 50 mg/kg	10,1 \pm 0,18	8,49 \pm 0,91*	0,17 \pm 0,19	1,00 \pm 0,25	9,99 \pm 0,23	7,49 \pm 1,12
В течение 10 дней – 500 мг/кг / For 10 days – 500 mg/kg	10,5 \pm 0,2*	9,82 \pm 0,43	0,60 \pm 0,24	0,83 \pm 0,17	9,92 \pm 0,40	8,99 \pm 0,42
Контроль / Control	9,52 \pm 0,37	10,65 \pm 0,21	0,17 \pm 0,17	1,17 \pm 0,31	9,32 \pm 0,32	9,49 \pm 0,31

Примечание: См. к таблице 5 / Note: See table 5

Изучено действие пантогематогена на фагоцитарную активность перитонеальных макрофагов. В обеих опытных группах зафиксировано статистически значимое (по сравне-

нию с контролем) усиление фагоцитарной активности перитонеальных макрофагов под влиянием пантогематогена (табл. 7).

Таблица 7 – Значения фагоцитарной активности перитонеальных макрофагов у мышей опытных и контрольной групп /

Table 7 – Values of phagocytic activity of peritoneal macrophages in mice of experimental and control groups

Срок исследования / Duration of the study	Доза пантогематогена / Pantohematogen doses		Контроль / Control (n = 15)
	50 мг/кг x 10 дней / 50 mg/kg x 10 days (n = 20)	500 мг/кг x 10 дней / 500 mg/kg x 10 days (n = 20)	
24 часа после окончания курса введения пантогематогена / 24 hours after completion of the pantohematogen administration course	92,50±4,01**	94,00±8,78*	65,00±7,38

Примечание: различия между опытной и контрольной группами достоверны (* p = 0,001; ** p < 0,05, метод оценки – t-критерий Стьюдента) /

Note: the differences between the experimental and control groups are significant (* p = 0.001; ** p < 0.05, Evaluation method - Students t-test)

Заключение. Проведенные исследования показали, что пантогематоген при внутри-желудочном введении мышам линии СВА в изученных дозировках и выбранных условиях не обладает аллергенными и иммунотоксическими свойствами.

Иммунотоксические свойства пантогематогена характеризуются выраженной стимулирующей фагоцитарной активности перитонеальных макрофагов, а также активизацией иммунного ответа на корпускулярный тимусзависимый антиген (эритроциты барана). В определенных условиях пантогематоген способствует усилению формирования антителообразующих клеток в селезенке и повышению

титров гемагглютининов в сыворотке крови. Кроме того, при введении пантогематогена наблюдается достаточно отчетливая тенденция к снижению интенсивности реакции предшественников Т-лимфоцитов, ответственных за развитие гиперчувствительности замедленного типа на эритроциты барана.

Материалы экспериментальных исследований являются необходимыми и основополагающими при проведении гигиенической экспертизы пантогематогена, как нового функционального ингредиента, и определяют возможность его использования при разработке специализированных продуктов с заданными лечебно-профилактическими свойствами.

Список литературы

1. Тутельян В. А. Здоровое питание для общественного здоровья. Общественное здоровье. 2021;1(1):56–64. DOI: <https://doi.org/10.21045/2782-1676-2021-1-1-56-64> EDN: MOMMXI
2. Новосёлова Е. Н. Рациональное питание как фактор здоровья: реалии и перспективы. Вестник Московского университета. Серия 18. Социология и политология. 2023;29(1):127–147. DOI: <https://doi.org/10.24290/1029-3736-2023-29-1-127-147> EDN: SJOMDI
3. Горбунова Е. О., Иванова Е. В. Питание как фактор здорового образа жизни. Проблемы современной науки и инновации. 2022;(1):11–15. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49728344> EDN: AGWBMS
4. Тутельян В. А., Никитюк Д. Б. Нутрициология и клиническая диетология: национальное руководство. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2020. 656 с. Режим доступа: <https://library.ngmu.ru/search/view?mfid=132121&irbisBase=MAIN>
5. Варивода А. А., Кенийз Н. В., Ребезов М. Б. Разработка научно обоснованных подходов к проектированию специализированных пищевых продуктов для геродиетического питания. Аграрная наука. 2023;(12):143–150. DOI: <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-377-12-143-150> EDN: EJOWLM
6. Никитюк Д. Б., Позняковский В. М., Сербя Е. М., Австриевских А. Н., Потороко И. Ю. Современные представления о микробиоме и его роли в регуляции обменных процессов, сохранении здоровья и работоспособности. Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии. 2022;10(2):59–72. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48559381> EDN: YRPKFY
7. Мирошина Т. А., Резниченко И. Ю. Значение нутригеномики и нутригенетики в пищевой науке. Индустрия питания. 2023;8(2):105–115. DOI: <https://doi.org/10.29141/2500-1922-2023-8-2-11> EDN: SEUINO
8. Коростелева М. М., Денисова Н. Н., Солнцева Т. Н. Возможность нутритивной коррекции рациона питания за счет специализированных пищевых продуктов. Вопросы питания. 2023;92(S5(549)):177–178.
9. Суслов Н. И., Гурьянов Ю. Г. Продукция на основе пантогематогена. Механизмы действия и особенности применения. Новосибирск: Сибирское университетское издательство, 2004. 144 с.

10. Лобач Е. Ю., Гурьянов Ю. Г., Позняковский В. М. Исследование потребительских свойств и функциональной направленности пантогематогена. Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии. 2016;4(4):73–79. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27441711> EDN: XCNEMF
11. Кротова М. Г. Перспективы использования сырья маралов для производства коллагена. Современные аспекты производства и переработки сельскохозяйственной продукции: сб. мат-лов II Международ. научн.-практ. конф., посвящ. 80-летию Алтайского ГАУ и биолого-технологического факультета. Барнаул: изд-во Алтайского ГАУ, 2023. С. 82–86. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=53321194> EDN: QJN1YF
12. Сергун В. П., Агеенко Д. Д., Позняковский В. М. Специализированный инновационный продукт на основе пантов марала: функциональные свойства, эффективность. Технология и товароведение инновационных пищевых продуктов. 2023;(6(83)):33–37. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=58905245> EDN: YEUWXH
13. Фролова Н. А., Резниченко И. Ю. Химический состав биологически активных веществ пантов северного оленя как источника микронутриентов для обогащения сахаристых кондитерских изделий. Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. 2018;12(2):24–28. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36573425> EDN: VOGCXI
14. Ho T. J., Tsai W. T., Wu J. R., Chen H. P. Biological Activities of Deer Antler-Derived Peptides on Human Chondrocyte and Bone Metabolism. Pharmaceuticals. 2024;17(4):434. DOI: <https://doi.org/10.3390/ph17040434>
15. Kang A. N., Lee J., Eor J. Y., Kwak M. J., Kim Y. A., Oh S., Kim Y. A comprehensive assessment of immunomodulatory potentials of Korean antler velvet extract in mouse and neurodegenerative Caenorhabditis elegans models. Journal of Animal Science and Technology. 2024. pp. 1–33. DOI: <https://doi.org/10.5187/jast.2024.e22>
16. Sui Z., Zhang L., Huo Y., Zhang Y. Bioactive components of velvet antlers and their pharmacological properties. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis. 2014;(87):229–240. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2013.07.044>
17. Orassay A., Sadvokassova D., Berdigaliyev A., Sagintayev A., Myrzagali S., Omarova Z., Toktarov N., Liu D., Xie Y. Deer antler extract: Pharmacology, rehabilitation and sports medicine applications. Pharmacological Research-Modern Chinese Medicine. 2024;10:100316. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prmcm.2023.100316>
18. Sergun V. P., Ageenko D. D., Burkova V. N., Poznyakovskiy V. M., Tokhiriyon B., Lapina V. Plant Oil-Based Dietary Supplement with Deer Antler Extract for Panic Attacks: A Clinical Study. Entomology and Applied Science Letters. 2023;10(1):125–130. DOI: <https://doi.org/10.51847/utaOIULnTq>
19. Sara R. B. M. E., Syse K. L., Mathiesen S. D. Precious blood and nourishing offal: past and present slaughtering perspectives in Sámi reindeer pastoralism. Pastoralism. 2022;12(1):20. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13570-021-00224-2>

References

1. Tutelyan V. A. Healthy food for public health. *Obshchestvennoe zdorov'e* = Public Health. 2021;1(1):56–64. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21045/2782-1676-2021-1-1-56-64>
2. Novoselova E. N. Rational nutrition as a health factor: realities and prospects. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 18. Sotsiologiya i politologiya* = Moscow State University Bulletin. Series 18. Sociology and Political Science. 2023;29(1):127–147. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24290/1029-3736-2023-29-1-127-147>
3. Gorbunova E. O., Ivanova E. V. Nutrition as a factor of a healthy lifestyle. *Problemy sovremennoy nauki i innovatsii*. 2022;(1):11–15. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49728344>
4. Tutel'yan V. A., Nikityuk D. B. Nutritionology and Clinical Dietetics: National guidelines. Moscow: GEOTAR-Media, 2020. 656 p. URL: <https://library.ngmu.ru/search/view?mfn=132121&irbisBase=MAIN>
5. Varivoda A. A., Keniyz N. V., Rebezov M. B. Development of scientifically based approaches to the design of specialized food products for gerodietetic nutrition. *Agrarnaya nauka* = Agrarian science. 2023;(12):143–150. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-377-12-143-150>
6. Nikityuk D. B., Poznyakovskiy V. M., Serba E. M., Avstrieviskikh A. N., Potoroko I. Yu. Modern concepts of the microbiome and its role in metabolic process regulation, health preservation, and performance. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Pishchevye i biotekhnologii* = Bulletin of South Ural State University, Series «Food and Biotechnology». 2022;10(2):59–72. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48559381>
7. Miroshina T. A., Reznichenko I. Yu. Nutrigenomics and nutrigenetics importance in the food science. *Industriya pitaniya* = Food Industry. 2023;8(2):105–115. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.29141/2500-1922-2023-8-2-11>
8. Korosteleva M. M., Denisova N. N., Solntseva T. N. The possibilities of nutritional correction of the diet due to specialized food products. *Voprosy pitaniya* = Problems of Nutrition. 2023;92(S5(549)):177–178. (In Russ.).
9. Suslov N. I., Guryanov Yu. G. Products based on pantoheumatogen. Mechanisms of action and application features. Novosibirsk: *Sibirskoe universitetskoe izdatel'stvo*, 2004. 144 p.
10. Lobach E. Yu., Guryanov Yu. G., Poznyakovskiy V. M. Research of consumer performance and functional orientation of pantogematogen. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Pishchevye i biotekhnologii* = Bulletin of South Ural State University, Series «Food and Biotechnology». 2016;4(4):73–79. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27441711>
11. Krotova M. G. Prospects for the use of maral raw materials for the production of collagen. Modern aspects of the production and processing of agricultural products: collection of articles of the II International scientific and practical Conference dedicated to the 80th anniversary of the Altai State Agrarian University and the Faculty of Biology and Technology. Barnaul: *Izd-vo Altayskogo GAU*, 2023. С. 82–86. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=53321194>
12. Sergun V. P., Ageenko D. D., Poznyakovskiy V. M. Special innovative product based on maral pants: functional properties, efficiency. *Tekhnologiya i tovarovedenie innovatsionnykh pishchevykh produktov*. 2023;(6(83)):33–37. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=58905245>

13. Frolova N. A., Reznichenko I. Yu. Chemical composition of biologically active substances of reindeer antlers as source of micronutrients for enrichment of sugar confectionery products. *Izvestiya Dagestanskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta. Estestvennye i tochnye nauki* = Dagestan State Pedagogical University. Journal Natural and Exact Sciences. 2018;12(2):24–28. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36573425>
14. Ho T. J., Tsai W. T., Wu J. R., Chen H. P. Biological Activities of Deer Antler-Derived Peptides on Human Chondrocyte and Bone Metabolism. *Pharmaceuticals*. 2024;17(4):434. DOI: <https://doi.org/10.3390/ph17040434>
15. Kang A. N., Lee J., Eor J. Y., Kwak M. J., Kim Y. A., Oh S., Kim Y. A comprehensive assessment of immunomodulatory potentials of Korean antler velvet extract in mouse and neurodegenerative *Caenorhabditis elegans* models. *Journal of Animal Science and Technology*. 2024. pp. 1–33. DOI: <https://doi.org/10.5187/jast.2024.e22>
16. Sui Z., Zhang L., Huo Y., Zhang Y. Bioactive components of velvet antlers and their pharmacological properties. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*. 2014;(87):229–240. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2013.07.044>
17. Orassay A., Sadvokassova D., Berdigaliyev A., Sagintayev A., Myrzagali S., Omarova Z., Toktarov N., Liu D., Xie Y. Deer antler extract: Pharmacology, rehabilitation and sports medicine applications. *Pharmacological Research-Modern Chinese Medicine*. 2024;10:100316. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prmcm.2023.100316>
18. Sergun V. P., Ageenko D. D., Burkova V. N., Poznyakovsky V. M., Tokhiriyon B., Lapina V. Plant Oil-Based Dietary Supplement with Deer Antler Extract for Panic Attacks: A Clinical Study. *Entomology and Applied Science Letters*. 2023;10(1):125–130. DOI: <https://doi.org/10.51847/utaOIULnTq>
19. Sara R. B. M. E., Syse K. L., Mathiesen S. D. Precious blood and nourishing offal: past and present slaughtering perspectives in Sámi reindeer pastoralism. *Pastoralism*. 2022;12(1):20. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13570-021-00224-2>

Сведения об авторах

Галина Аркадьевна Дорн, кандидат с.-х. наук, доцент, и. о. зав. кафедрой «Технологии продуктов питания», ФГБОУ ВО «Государственный аграрный университет Северного Зауралья», ул. Республики, д. 7, г. Тюмень, Российская Федерация, 625003, e-mail: pr@gausz.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-0559-9444>

Лобач Евгения Юрьевна, кандидат техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Сочинский государственный университет», ул. ул. Пластунская, 94, г. Сочи, Российская Федерация, 354000, e-mail: university@sutr.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3708-7886>

Юрий Герасимович Гурьянов, кандидат техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Государственный аграрный университет Северного Зауралья», ул. Республики, д. 7, г. Тюмень, Российская Федерация, 625003, e-mail: pr@gausz.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-5870-9184>

✉ **Бойсджони Тохириён**, доктор техн. наук, профессор кафедры управления качеством и экспертизы товаров и услуг, ФГБОУ ВО «Уральский государственный экономический университет», ул. 8 Марта/Народной Воли, д. 62/45, г. Екатеринбург, Российская Федерация, 620144, e-mail: usue@usue.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0321-0359>, e-mail: tohiriyoni@gmail.com

Валерий Михайлович Позняковский, доктор биол. наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, ФГБОУ ВО «Уральский государственный экономический университет», ул. 8 Марта/Народной Воли, д. 62/45, г. Екатеринбург, Российская Федерация, 620144, e-mail: usue@usue.ru; руководитель научно-образовательного центра «Прикладная биотехнология и нутрициология», профессор кафедры «Гигиена», ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный медицинский университет Министерства здравоохранения Российской Федерации», ул. Ворошилова, 22А, г. Кемерово, Российская Федерация, 650056, e-mail: kemsma@kemsma.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5749-1459>

Information about the authors

Galina A. Dorn, PhD in Agricultural Science, associate professor, Acting Head of the Department of Food Technologies, Northern Trans-Ural State Agricultural University, Republic Street, 7, Tyumen, Russian Federation, 625003, e-mail: pr@gausz.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-0559-9444>

Evgenia Yu. Lobach, PhD in Engineering, associate professor, Sochi State University, Plastunskaya Street, 94, Sochi, Russian Federation, 354000, e-mail: university@sutr.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3708-7886>

Yuri G. Guryanov, PhD in Engineering, associate professor, Northern Trans-Ural State Agricultural University, Republic Street, 7, Tyumen, Russian Federation, 625003, e-mail: pr@gausz.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-5870-9184>

✉ **Boisjoni Tohiriyon**, DSc in Engineering, professor at the Department of Quality Management and Expertise of Goods and Services, Ural State University of Economics, 8th of March Street/Narodnaya Volya, 62/45, Ekaterinburg, Russian Federation, 620144, e-mail: usue@usue.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0321-0359>, e-mail: tohiriyoni@gmail.com

Valery M. Poznyakovsky, DSc in Biological Science, professor, Honored Scientist of the Russian Federation, Ural State University of Economics, 8th of March street/Narodnaya Volya, 62/45, Ekaterinburg, Russian Federation, 620144, e-mail: usue@usue.ru; Head of the Scientific and Educational Center «Applied Biotechnology and Nutrition», professor at the Department of Hygiene, Kemerovo State Medical University of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation, 22A Voroshilov Street, Kemerovo, Russian Federation, 650056, e-mail: kemsma@kemsma.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5749-1459>

✉ – Для контактов / Corresponding author

<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.3.425-434>

УДК 631.8:636.086.3

Влияние минеральных удобрений на продуктивность многолетних трав в длительном стационарном опыте

© 2024. Л. Н. Прокина✉, С. В. Пугаев

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

В статье представлены результаты исследований (1991–1994, 2005–2007 и 2015–2018 гг.), проведенных на черноземе выщелоченном тяжелосуглинистом в условиях Республики Мордовия. Цель исследований – провести сравнительную оценку влияния минеральных удобрений на урожайность и качество укосной массы люцерны и костреца. Анализ многолетних результатов показал, что продуктивность люцерны на протяжении трех ротаций полевого севооборота была выше на 0,64, 1,05 и 0,15 т/га по сравнению с кострцом (5,73, 4,43 и 5,54 т/га). Внесение фосфорно-калийных (РК) удобрений под люцерну увеличивало сбор урожая в среднем на 18 % при окупаемости 1 кг д. в. удобрений 8 кг сена и дополнительным доходом 1,3 руб/руб. Использование под посевы костреца полного минерального удобрения с дозами азота N₃₀₋₉₀ увеличило урожайность культуры от 36 до 67 % по сравнению с РК-вариантом (4,15 т/га), дополнительный доход составил 1,15–1,29 руб/руб., окупаемость 1 кг д. в. азота – 32,7–45,5 кг сена. Анализ экспериментального материала показал, что в зеленой массе люцерны концентрация сырого протеина в 1,5 раза больше, чем костреца (12,89 %). Полное минеральное удобрение повышало содержание сырого протеина в зеленой массе костреца в отдельные годы от 8 до 28 %, у люцерны лишь на 2–3 % по сравнению с РК-вариантом. По сбору сырого протеина с единицы площади посевы люцерны (в среднем 1 133 кг/га) выгодно отличались от костреца (684 кг/га).

Ключевые слова: люцерна, кострец, урожайность, окупаемость удобрений, дополнительный доход, сырой протеин, сбор сырого протеина

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого» (тема № 0528-2019-0100).

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Прокина Л. Н., Пугаев С. В. Влияние минеральных удобрений на продуктивность многолетних трав в длительном стационарном опыте. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2024;25(3):425–434.

DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.3.425-434>

Поступила: 11.04.2024

Принята к публикации: 29.05.2024

Опубликована онлайн: 26.06.2024

The effect of mineral fertilizers on the productivity of perennial grasses in a long-term stationary experiment

© 2024. Lyudmila N. Prokina✉, Sergey V. Pugaev

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

The article presents the results of studies (1991–1994, 2005–2007 and 2015–2018) conducted on leached heavy loam chernozem in the Republic of Mordovia. The purpose of the research is to conduct a comparative assessment of the effect of mineral fertilizers on the yield and quality of alfalfa and awnless brome. The analysis of long-term results showed that the productivity of alfalfa during three rotations of the field crop rotation was higher by 0.64, 1.05 and 0.15 t/ha compared with the awnless brome (5.73, 4.43 and 5.54 t/ha). The application of phosphorus-potassium (PK) fertilizers for alfalfa increased the harvest by an average of 18 %, with a payback of 1 kg a.i. of fertilizer with 8 kg of hay and an additional income of 1.3 rubles/rub. The use of a full mineral seed with doses of nitrogen N₃₀₋₉₀ for awnless brome increased crop yield from 36 to 67 % compared to the PK variant (4.15 t/ha), additional income amounted to 1.15–1.29 rubles / rub, payback of 1 kg of a.i. of nitrogen – 32.7–45.5 kg of hay. The analysis of the experimental material showed that the concentration of crude protein in the green mass of alfalfa was 1.5 times higher than in the awnless brome (12.89 %). Complete mineral fertilizer increased the crude protein content in the green mass of the awnless brome in some years from 8 to 28 %, in alfalfa only by 2–3 % compared with the PK variant. According to the collection of crude protein per unit area, alfalfa crops (on average 1,133 kg/ha) differed favorably from awnless brome (684 kg/ha).

Keywords: alfalfa, awnless brome, yield, payback of fertilizers, additional income, crude protein, collection of crude protein

Acknowledgement: the research was carried out under the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of Federal Agricultural Research Center of the North-East named N.V. Rudnitsky (theme No. 0528-2019-0100).

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

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

For citations: Prokina L. N. Pugaev S. V. The effect of mineral fertilizers on the productivity of perennial grasses in a long-term stationary experiment. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2024;25(3):425–434. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.3.425-434>

Received: 11.04.2024

Accepted for publication: 29.05.2024

Published online: 26.06.2024

Многолетние травы во всех почвенно-климатических условиях и типах севооборотов имеют большое значение в получении высокобелковых, энергонасыщенных кормов, улучшают плодородие и обеспечивают последующие культуры севооборота доступными элементами питания, позволяющими без значительных затрат повышать продуктивность культур [1, 2]. В структуре посевных площадей и севооборотов они должны занимать не менее 25–40 % для обеспечения устойчивости сельскохозяйственных земель, плодородия почв и стабильности растениеводства. К основным факторам, обеспечивающим прирост урожайности сельскохозяйственных культур и повышение почвенного плодородия, относится научно обоснованное применение удобрений [3, 4], которое наиболее полно можно оценить в длительных полевых опытах. Так, на серо-каштановой почве внесение минеральных удобрений под люцерну в дозе $N_{90}P_{90}K_{60}$ увеличивало сбор зеленой массы люцерны с 16,4 до 45,8 т/га и сырого протеина на 1,75 % [5]. В условиях Самарского Заволжья при внесении сульфата аммония в дозах 120 и 150 кг/га урожайность зеленой массы люцерны за два укоса составила 53,6 и 53,5 т/га, что на 5,0 и 4,8 т/га больше, чем без удобрений. В вариантах с азотным серосодержащим удобрением марки N:S (26:13) в дозах 120 и 150 кг/га превышение контроля составило 14,7 и 12,6 т/га [6]. На черноземе выщелоченном тяжелосуглинистом с низким содержанием гумуса экспериментально доказана важность внесения небольших стартовых доз азота (до 60 кг/га д. в.) для начального развития всходов люцерны и необходимость его применения на посевах второго и третьего годов жизни для интенсивного отрастания весной [7]. На черноземе выщелоченном Западного Предкавказья внесение $N_{20}P_{20}K_{20}$ обеспечивает высокую урожайность (34,75 т/га зеленой массы в среднем за 3 укоса) люцерны второго года с хорошим

качеством (протеин 22,6 %). Дальнейшее увеличение доз удобрений не приводит к улучшению заявленных показателей, а значит сопровождается снижением окупаемости урожаем [8]. В условиях среднетаежной подзоны Якутии внесение минеральных удобрений в дозе $N_{60}P_{60}K_{60}$ способствует сохранению костреца безостого до 63 % [9].

Данные по урожайности многолетних трав на черноземах выщелоченных в условиях Мордовии получены [10, 11], но сравнительную оценку различных видов трав по урожайности зеленой массы и ее качеству при одинаковых условиях возделывания и длительном внесении минеральных удобрений не проводили, что и послужило необходимостью изучения этого вопроса.

Цель исследований – провести сравнительную оценку влияния минеральных удобрений на урожайность и качество зеленой массы люцерны и костреца, возделываемых в условиях Республики Мордовия.

Научная новизна – показана зависимость урожайности и качества укосной массы люцерны и костреца от внесения минеральных удобрений на протяжении трех ротаций полевого севооборота.

Материал и методы. Работа выполнена в Мордовском НИИ сельского хозяйства – филиале ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока в соответствии с планом НИР учреждения на базе стационарного полевого опыта, заложенного в 1972–1973 гг. последовательно в двух полях по методике Б. А. Доспехова¹.

Почва опытного участка – чернозем выщелоченный тяжелосуглинистый. Содержание физической глины в пахотном слое 58,5 %. Мощность гумусового горизонта 50–60 см. Пахотный слой сильно выпахан и распылен, имеет пылеватую и комковато-глыбистую структуру. Агрохимическая характеристика почвы представлена в таблице 1. Анализ почвы выполняли

¹Доспехов Б. А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М.: Колос, 1979. 416 с.

методами: $pH_{\text{кол}}$ – ионометрическим (ГОСТ 26483 – 85)², гидролитическая кислотность – по Каппену в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26212–91)³, сумма поглощенных оснований – по Каппену (ГОСТ 27821–88)⁴. Подвижный

фосфор и калий определяли по Кирсанову в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26207–91)⁵ колориметрическим методом, содержание гумуса – по Тюрину (ГОСТ 26213–91)⁶.

Таблица 1 – Агрохимическая характеристика пахотного слоя почвы /
Table 1 – Agrochemical characteristics of the arable soil layer

Годы / Years	Гумус, % / Humus, %	$pH_{\text{кол}}$	Hr	S	V, %	Подвижные формы, мг/кг / Mobile forms mg/kg	
			мг-экв/100 г / mg-eq/100 g			P_2O_5	K_2O
1972-1973 гг. – перед закладкой опытов / Before laying the experiment	8,70	5,4	6,5	33,6	84	65	119
2002 г. – IV ротация / IV Rotation	8,83	4,9	8,3	31,6	79	70	123
2013 г. – V ротация / V Rotation	9,03	4,8	-	-	-	122	156

Расположение вариантов в опыте рендомизированное, повторность трехкратная. Посевная площадь делянки 75 м² (7,5×10 м), учетная – 50 м² (5×10 м).

Минеральные удобрения вносили в соответствии со схемой опыта: фосфорно-калийные – в форме двойного суперфосфата и хлористого калия под травы – вручную под основную обработку почвы в запас на годы пользования, азотные удобрения в форме аммиачной селитры – ежегодно. Учет урожая многолетних трав проводили путем скашивания вручную на учетных площадках с последующим взвешиванием зеленой массы: первый укос люцерны – в период «бутонизация–начало цветения», костреца – «выметывание–начало цветения»; второй укос – по мере формирования укосной массы. Урожайные данные обрабатывали методом дисперсионного анализа⁷. Технология возделывания многолетних трав – традиционная для

зоны проведения исследований, кроме изучаемых факторов⁸.

В опыте изучали пять вариантов удобрённости (табл. 2): 1. Без удобрений с 1972 года (контроль). 2. Фосфорно-калийные удобрения (РК – фон). 3. Фон + N₁. 4. Фон + N₂. 5. Фон + N₃.

В опытах использовали семена районированных сортов люцерны изменчивой Вега-87 и Находка, костреца безостого – Пензенский 1. В первых двух ротациях травы высевали под покров ячменя и яровой пшеницы с нормой высева люцерны сорта Вега-87 – 13 кг/га, костреца – 25 кг/га. Покровную культуру убирали на зерно в фазе «полная спелость» зерна прямым комбайнированием. В 2015 г. 15 июля был проведен беспокровный посев многолетних трав (сорт люцерны Находка) и костреца сеялкой СЗТ–3.6 с последующим прикатыванием. Норма высева люцерны – 15 кг/га, костреца – 25 кг/га.

²ГОСТ 26483-85. Почвы. Приготовление солевой вытяжки и определение ее pH по методу ЦИНАО. М.: изд-во стандартов, 1985. 4 с. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/738/4294827946.pdf>

³ГОСТ 26212-91. Почвы. Определение гидролитической кислотности по методу Каппена в модификации ЦИНАО. М.: изд-во стандартов, 1992. 7 с. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/33a/4294828268.pdf>

⁴ГОСТ 27821-91. Почвы. Определение суммы поглощенных оснований по методу Каппена. М.: изд-во стандартов, 1988. 7 с. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/3a6/4294826916.pdf>

⁵ГОСТ 26207-91. Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО. М.: изд-во стандартов, 1992. 7 с. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/c43/4294828273.pdf>

⁶ГОСТ 26213-91. Почвы. Методы определения органического вещества. М.: изд-во стандартов, 1992. 8 с. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/f09/4294828267.pdf>

⁷Доспехов Б. А. Указ. соч.

⁸Адаптивные технологии возделывания сельскохозяйственных культур в условиях Республики Мордовии: методическое руководство. Под ред. А. М. Гурьянова. Саранск: изд-во Мордовского ун-та, 2003. 428 с.

Таблица 2 – Распределение удобрений в опыте по ротациям севооборота, кг/га д. в. /
Table 2 – Distribution of fertilizers in the experiment by rotations of crop rotation kg/ha a. i.

Годы, ротация / Years (rotation)	Вариант / Variant				
Люцерна / Alfalfa					
1991–1994 гг. (III ротация) / 1991–1994 (III rotation)	Без удобрений / Without fertilizers	P ₄₈ K ₆₈	N ₁₅ P ₄₈ K ₆₈	N ₃₀ P ₄₈ K ₆₈	N ₄₅ P ₄₈ K ₆₈
2005–2007 гг. (IV ротация) / 2005–2007 (IV rotation)	Без удобрений / Without fertilizers	P ₅₀ K ₈₀	N ₁₅ P ₅₀ K ₈₀	N ₃₀ P ₅₀ K ₈₀	N ₄₅ P ₅₀ K ₈₀
2015–2018 гг. (V ротация) / 2015–2018 (V rotation)	Без удобрений / Without fertilizers	P ₄₀ K ₄₀	N ₄₀ P ₄₀ K ₄₀	N ₅₀ P ₄₀ K ₄₀	N ₆₀ P ₄₀ K ₄₀
Кострец / Awnless brome					
1991–1994 гг. (III ротация) / 1991–1994 (III rotation)	Без удобрений / Without fertilizers	P ₄₈ K ₆₈	N ₃₀ P ₄₈ K ₆₈	N ₆₀ P ₄₈ K ₆₈	N ₉₀ P ₄₈ K ₆₈ .
2005–2007 гг. (IV ротация) / 2005–2007 (IV rotation)	Без удобрений / Without fertilizers	P ₅₀ K ₈₀	N ₃₀ P ₅₀ K ₈₀	N ₆₀ P ₅₀ K ₈₀	N ₉₀ P ₅₀ K ₈₀ .
2015–2018 гг. (V ротация) / 2015–2018 (V rotation)	Без удобрений / Without fertilizers	P ₄₀ K ₄₀	N ₄₀ P ₄₀ K ₄₀	N ₆₀ P ₄₀ K ₄₀	N ₈₀ P ₄₀ K ₄₀

Результаты и их обсуждение. Влагообеспеченность возделываемых культур в мае–августе 2005 и 2017 гг. (2 года, или 18 % общего количества лет наблюдений) находилась в пределах нормы, 1994 г. – переувлажненный (9 %), 1991, 1992, 1993, 2006, 2007, 2015, 2016 гг. – недостаточно увлажненные (7 лет, или 64 %), 2018 г. – сильно засушливый (9 %) (табл. 3).

В 1991 г. период формирования урожая первого укоса многолетних трав характери-

зовался как нормальный по условиям тепло- и влагообеспеченности (ГТК = 1,0...1,1), в 1992 и 1993 гг. – засушливые (ГТК = 0,8 и 0,3), 1994 г. – средней степени переувлажнения (ГТК = 1,4...2,0). Формирование урожая второго укоса трав в 1991 и 1992 гг. проходило в условиях недостаточного влагообеспечения (ГТК = 0,7 и 0,9), в 1993 и 1994 гг. – в условиях средней степени переувлажнения (ГТК = 1,4 и 2,0).

Таблица 3 – Метеорологические условия в годы проведения исследований /
Table 3 – Weather conditions in the years of research

<i>Год /</i> <i>Year</i>	<i>Количество осадков, мм /</i> <i>Amount of precipitation, mm</i>		<i>Температурный режим, °C /</i> <i>Temperature regime, °C</i>		<i>ГТК за вегета- цию май–август /</i> <i>HTC for vegeta- tion May–August</i>
	<i>за год /</i> <i>for the year</i>	<i>за вегетацию май–август /</i> <i>for the growing season</i> <i>May–August</i>	<i>среднесуточная</i> <i>за вегетацию / average</i> <i>daily for the growing season</i>	<i>сумма t>10 ° /</i> <i>the amount</i> <i>t>10°</i>	
1991	483	194	17,7	2228	0,77
1992	426	165	16,1	1936	0,66
1993	507	251	15,8	1847	0,82
1994	471	245	14,7	1699	1,68
2005	391	172	17,3	2186	0,96
2006	446	195	16,8	2099	0,78
2007	407	125	18,1	2216	0,65
2015	401	140	17,7	2450	0,68
2016	466	148	18,7	2417	0,68
2017	538	239	16,2	1928	1,19
2018	286	82	18,4	2234	0,45

Из последующих трех лет возделывания многолетних трав только в 2005 г. урожай первого укоса формировался в нормальных условиях (ГТК = 1,45), в 2006 и 2007 гг. – в условиях дефицита влаги (ГТК = 0,64 и 0,17). Зеленая масса второго укоса развивалась в засушливых условиях 2005 и 2007 гг. (ГТК = 0,63 и 0,84) и нормальных по увлажнению в 2006 г. (ГТК = 1,35).

Рост и развитие многолетних трав в 2015 г. (посев 15.07.2015) проходили не в очень благоприятных метеорологических условиях. Во второй декаде июля количество выпавших осадков составило 28 мм, или 43 % от нормы (ГТК = 1,7). Сумма эффективных температур (выше 10 °С) составила 2 450 °С (климатическая норма 1 904 °С). Если перед посевом и после были осадки, что положительно сказалось на всхожести трав, то потом их количество снизилось и в сентябре практически дождей

не было. За вегетацию трав выпало всего 76 мм осадков (ГТК = 0,62). Период кущения костреца и ветвления люцерны проходил в условиях дефицита влаги (ГТК = 0,0). Стояла теплая погода (в пределах нормы) и практически не было осадков. Во второй декаде сентября наблюдали теплую сухую погоду с температурой выше нормы на 2 градуса.

В 2016 и 2018 гг. формирование урожая обоих укосов проходило в условиях дефицита влаги (ГТК = 0,77 и 0,65; 0,52 и 0,48 соответственно). В 2017 г. во время обоих укосов сложились нормальные условия (ГТК = 1,12 и 1,1).

Таким образом, метеорологические условия в годы проведения исследований были различными, но типичными для зоны.

Как показали результаты исследований, продуктивность многолетних трав различалась как по годам, так и при использовании минеральных удобрений (табл. 4).

Таблица 4 – Влияние минеральных удобрений на урожайность многолетних трав, т/га сухого вещества / Table 4 – The effect of mineral fertilizers on the yield of perennial grasses, t/ha of dry matter

Вариант / Variant	Годы исследований / Years of research		
	1991–1994 гг. (III ротация) / 1991–1994 (III rotation)	2005–2007 гг. (IV ротация) / 2005–2007 (IV rotation)	2015–2018 гг. (V ротация) / 2015–2018 (V rotation)
Люцерна / Alfalfa			
Без удобрений (контроль) / Without fertilizers (control)	5,27	4,74	4,64
РК	6,52	5,42	5,32
N ₁ РК	6,71	5,74	5,93
N ₂ РК	6,74	5,72	6,32
N ₃ РК	6,63	5,77	6,23
Кострец / Awnless brome			
Без удобрений (контроль) / Without fertilizers (control)	3,15	3,02	3,18
РК	4,46	3,68	4,30
N ₁ РК	6,36	4,63	5,97
N ₂ РК	7,10	5,20	6,63
N ₃ РК	7,58	5,63	7,62
НСР ₀₅ ч. р. / LSD ₀₅ ch. r.	0,15	0,18	0,13
НСР ₀₅ (А) / LSD ₀₅ (А)	0,07	0,08	0,06
НСР ₀₅ (В) / LSD ₀₅ (В)	0,11	0,12	0,09
НСР ₀₅ (АВ) / LSD ₀₅ (АВ)	0,11	0,12	0,09

Во все годы исследований урожайность люцерны (5,27, 4,74 и 4,64 т/га) была выше, чем у костреца соответственно на 2,12, 1,72 и 1,46 т/га сухого вещества. В вариантах без внесения азотных удобрений (контроль, РК) люцерна по сбору сухого вещества превышала кострец на 67–57–46 % и 46–48–24 % соответственно от III к V ротации. В контрольном варианте

максимальную урожайность 5,27 т/га сена люцерна обеспечивала в III ротации, что на 0,53 и 0,63 т/га больше, чем в двух последующих. Под действием фосфорно-калийных удобрений сбор сена люцерны увеличивался на 1,25, 0,69 и 0,68 т/га, или на 24, 15 и 15 % по сравнению с соответствующими вариантами без удобрений. Внесение полного минерального удобрения

в 1991–1994 гг. способствовало дополнительному получению сена в среднем – 0,17 т/га, в 2005–2007 гг. – 0,31 т/га и в 2015–2018 гг. – 0,84 т/га сена по сравнению с РК-вариантом. Наиболее эффективное действие полного минерального удобрения (собрано в среднем 6,69 т/га сухого вещества) отмечено в 1991–1994 гг. и это больше на 0,95 т/га, чем в 2005–2008 гг. и на 0,53 т/га, чем в 2015–2018 гг. При внесении более высоких доз азота (N_3) в основном отмечено или снижение (III и V ротации), или незначительная прибавка (IV ротация) урожайности культуры. При сравнении двух сортов люцерны можно отметить, что сорт Находка более отзывчив на внесение полного минерального удобрения (прибавка от 0,61 до 1,0 т/га сена) против 0,11–0,34 т/га у сорта Вега-87.

В варианте без удобрений урожайность костреца распределилась следующим образом: $3,18 > 3,15 > 3,02$ т/га сухого вещества соответственно в V, III и IV ротациях. Внесение фосфорно-калийных удобрений обеспечивало прибавку к контролю в среднем за ротацию – 1,31; 0,66; 1,12 т/га. Наибольший сбор сухого вещества в варианте с фосфорно-калийными

удобрениями получили в 1991–1994 гг. – 4,46 т/га, что больше на 0,78 и 0,16 т/га сена, чем в 2005–2007 гг. и 2015–2018 гг. Исследованиями установлена высокая агрономическая эффективность использования минерального азота при возделывании костреца. Так, при внесении азота в составе полного минерального удобрения прибавка к варианту с фосфорно-калийным удобрением составила от дозы N_1 – 1,90, 0,94, 1,67 т/га сухого вещества, или 43, 59, 70 %; N_2 – 2,64, 1,52, 2,33, или 26, 41, 53 %; N_3 – 3,12, 1,95, 3,33 т/га, или 39, 54, 77 %. Максимальный сбор сена костреца был в V ротации в варианте N_3PK и составил 7,63 т/га, несколько ему уступал аналогичный вариант (меньше на 0,05 т/га) в III ротации. Наиболее эффективно полное минеральное удобрение сработало в III и V ротациях – урожайность сена получена на уровне 6,36...7,58 т/га и 5,97...7,63 т/га соответственно, в IV ротации – 4,62...5,63 т/га.

При возделывании люцерны в первых двух ротациях окупаемость 1 кг д. в. азота по мере увеличения его дозы в составе полного минерального удобрения уменьшалась и составила 12,7–7,3–2,4 и 20,7–9,7–7,6 кг сена (табл. 5).

Таблица 5 – Окупаемость минеральных удобрений при возделывании люцерны /

Table 5 – Payback of mineral fertilizers by alfalfa cultivation

Вариант / Variant	Урожайность в контроле и прибавка от внесения, т/га сухого в-ва / Yield under control and increase, t/ha of dry matter		Окупаемость 1 кг д. в. удобрений / Payback of 1 kg a. i. of fertilizers	
	PK	N	дополнительным коли- чеством сена, кг / addi- tional amount of grain, kg	дополнительным дохо- дом, руб/руб. / additional income, rub/rub.
1991–1994 гг.				
Без удобрений / Without fertilizers	5,27	-	-	-
$P_{48}K_{68}$	1,25	-	10,8	1,46
$N_{15}P_{48}K_{68}$	-	0,19	12,7	1,45
$N_{30}P_{48}K_{68}$	-	0,22	7,3	1,40
$N_{45}P_{48}K_{68}$	-	0,11	2,4	1,33
2005–2007 гг.				
Без удобрений / Without fertilizers	4,74	-	-	-
$P_{50}K_{80}$	0,69	-	5,3	1,26
$N_{15}P_{50}K_{80}$	-	0,31	20,7	1,26
$N_{30}P_{50}K_{80}$	-	0,29	9,7	1,21
$N_{45}P_{50}K_{80}$	-	0,34	7,6	1,18
2015–2018 гг.				
Без удобрений / Without fertilizers	4,64	-	-	-
$P_{40}K_{40}$	0,68	-	8,5	1,18
$N_{40}P_{40}K_{40}$	-	0,61	15,2	1,14
$N_{50}P_{40}K_{40}$	-	1,00	20,0	1,19
$N_{60}P_{40}K_{40}$	-	0,91	15,2	1,15

Аналогичную ситуацию наблюдали с дополнительным доходом 1,45–1,40–1,33 и 1,26–1,21–1,18 руб/руб. Окупаемость РК-варианта несколько уступала варианту с полным минеральным удобрением с дозой N₁ на 1,9, 15,4 и 6,7 кг сена, но дополнительный доход был или на уровне, или чуть ниже. В последней ротации в варианте с полным минеральным удобрением при промежуточной дозе азота (50 кг д. в.) отмечено увеличение окупаемости 1 кг д. в. азота сеном на 4,8 кг и дополнительного дохода (0,04 руб/руб.) по сравнению с вариантом N₁PK и N₃PK (15,2 кг сена и 1,14–1,15 руб/руб.). Окупаемость 1 кг д. в. азота в составе полного минерального удобрения при возделывании злаковой культуры по ротациям составила в

среднем 47,3, 26,1 и 40,7 кг сена (табл. 6). Величина данного показателя снижалась по мере увеличения дозы азота в первых двух ротациях (от 63,3 до 34,7 и от 31,3 до 21,7 кг сена на 1 кг д. в. азота). Исключением была V ротация, где вариант с N₂PK (38,8 кг сена на 1 кг д. в. азота) уступал вариантам с дозой N₁ и N₃, у которых была практически одинаковая окупаемость 41,8 и 41,6 кг сена. Дополнительный доход во всех трех ротациях от фосфорно-калийного удобрения составил 1,0 руб/руб. и ниже до 0,85 руб/руб., что свидетельствует о нецелесообразности его использования под костреч. Внесение полного минерального удобрения по мере увеличения дозы азота способствовало росту дополнительного дохода от 0,97 до 1,42 руб/руб.

Таблица 6 – Окупаемость минеральных удобрений при возделывании костреча /

Table 6 – Payback of mineral fertilizers when cultivating awnless brome

Вариант / Variant	Урожайность в контроле и прибавка от внесения, т/га сухого в-ва / Yield under control and increase, t/ha of dry matter		Окупаемость 1 кг д. в. удобрений / Payback of 1 kg a. i. of fertilizers	
	PK	N	дополнительным коли- чеством сена, кг / addi- tional amount of grain, kg	дополнительным дохо- дом, руб/руб. / additional income, rub/rub.
1991–1994 гг.				
Без удобрений / Without fertilizers	3,15	-	-	-
P ₄₈ K ₆₈	0,31	-	2,7	1,00
N ₃₀ P ₄₈ K ₆₈	-	1,90	63,3	1,32
N ₆₀ P ₄₈ K ₆₈	-	2,64	44,0	1,38
N ₉₀ P ₄₈ K ₆₈	-	3,12	34,7	1,42
2005–2007 гг.				
Без удобрений / Without fertilizers	3,02	-	-	-
P ₅₀ K ₈₀	0,66	-	5,1	0,85
N ₃₀ P ₅₀ K ₈₀	-	0,94	31,3	0,97
N ₆₀ P ₅₀ K ₈₀	-	1,52	25,3	1,09
N ₉₀ P ₅₀ K ₈₀	-	1,95	21,7	1,07
2015–2018 гг.				
Без удобрений / Without fertilizers	3,18	-	-	-
P ₄₀ K ₄₀	1,12	-	14,0	0,95
N ₄₀ P ₄₀ K ₄₀	-	1,67	41,8	1,15
N ₆₀ P ₄₀ K ₄₀	-	2,33	38,8	1,23
N ₈₀ P ₄₀ K ₄₀	-	3,33	41,6	1,37

Таким образом, результаты многолетних исследований показали, что на черноземе выщелоченном урожайность люцерны была выше на 0,64, 1,05 и 0,15 т/га по сравнению с костречом (5,73, 4,43 и 5,54 т/га). Под люцерну целесообразно внесение фосфорно-калийных удобрений, что увеличивает сбор урожая на

18 % (в среднем), под костреч полное минеральное с дозой азота N₃₀₋₉₀, при этом урожай последнего увеличивается на 1,5–2,8 т/га сухого вещества по сравнению с РК-вариантом.

В сочетании с высокой урожайностью люцерны обладает еще и высокой кормовой продуктивностью. Она обеспечивает самый

высокий сбор белка с единицы площади от 1,5 до 2,0 т/га, что в 3,5 раза больше, чем зерновые культуры [12]. Оценка белковой продуктивности показала преимущество люцерны, где

количество сырого протеина за период исследований в среднем по вариантам (19,19...19,62 %) было значительно выше в сравнении с кострцом (12,22...14,01 %) (табл. 7).

Таблица 7 – Влияние минеральных удобрений на качество урожая многолетних трав /
Table 7 – The effect of mineral fertilizers on the quality of the harvest of perennial grasses

Вариант / Variant	Люцерна / Alfalfa		Кострец / Awnless brome	
	сырой протеин, % на абс. сухое в-во / crude protein, % on a completely dry substance	сбор сырого протеина, кг/га / collection of crude protein, kg/ha	сырой протеин, % на абс. сухое в-во / crude protein, % on a completely dry substance	сбор сырого протеина, кг/га / collection of crude protein, kg/ha
1991–1994 гг.				
Без удобрений / Without fertilizers	18,88	995	10,81	340
P ₄₈ K ₆₈	18,88	1231	10,94	488
N _{15–30} P ₄₈ K ₆₈	19,38	1300	12,56	799
N _{30–60} P ₄₈ K ₆₈	19,31	1301	13,19	936
N _{45–90} P ₄₈ K ₆₈	19,50	1293	13,62	1032
2005–2007 гг.				
Без удобрений / Without fertilizers	19,75	936	13,44	406
P ₅₀ K ₈₀	19,19	1042	13,31	490
N _{15–30} P ₅₀ K ₈₀	19,88	1141	14,18	655
N _{30–60} P ₅₀ K ₈₀	19,38	1108	14,38	748
N _{45–90} P ₅₀ K ₈₀	19,88	1147	14,75	830
2015–2018 гг.				
Без удобрений / Without fertilizers	19,12	887	10,69	340
P ₄₀ K ₄₀	19,06	1014	10,56	454
N ₄₀ P ₄₀ K ₄₀	19,56	1160	13,06	780
N _{50–60} P ₄₀ K ₄₀	19,25	1217	13,56	899
N _{60–80} P ₄₀ K ₄₀	19,62	1222	13,88	1059

Применение минеральных удобрений, в том числе азотных, оказало определенное влияние на концентрацию сырого протеина в урожае люцерны (прибавки по сравнению с соответствующими фосфорно-калийными вариантами по ротациям 0,50–0,62; 0,19–0,69 и 0,19–0,56 %). Содержание сырого протеина в растениях кострца довольно сильно зависело от дозы азотной подкормки на фоне фосфорно-калийного удобрения. Так, при использовании фосфорно-калийных удобрений, содержание сырого протеина в урожае кострца (10,94; 13,31; 10,56 %) было в основном несколько ниже по сравнению с вариантом без удобрений (10,81; 13,44; 10,69 %), то при внесении азота в количестве N₁ на фоне фосфорно-калийного удобрения концентрация сырого протеина повышалась до 12,56; 14,18; 13,06 %. Прибавки от последующих доз N₂ и N₃ составили

соответственно 2,25; 1,07; 3,00 и 2,68; 2,22; 3,32 % по сравнению с РК-вариантом.

Анализ экспериментального материала показал, что в зеленой массе люцерны концентрация сырого протеина в 1,5 раза больше, чем кострца (12,89 %). Полное минеральное удобрение по сравнению с РК-вариантом повышало содержание сырого протеина в зеленой массе кострца в отдельные годы от 8 до 28 %, у люцерны лишь на 2–3 %.

Важным показателем продуктивности многолетних трав является сбор растительного белка с единицы площади. Данный показатель зависит как от количества сырого протеина, так и урожайности культур.

По сбору сырого протеина с единицы площади посевы люцерны (в среднем 1 133 кг/га) выгодно отличаются от кострца (684 кг/га) (табл. 7). Применение одних фосфорно-калийных

удобрений и полного минерального удобрения с низкой дозой азота (N_1) способствовало увеличению сбора сырого протеина на 236, 106, 127 и 305, 205, 273 кг/га по сравнению с соответствующими вариантами без удобрений. Увеличение дозы азота не всегда приводило к повышению этого показателя.

Сбор сырого протеина урожаем костреца в среднем за годы исследований составил 684 кг/га (по ротациям 719, 626 и 706 кг/га). В варианте без применения удобрений сбор сырого протеина урожаем костреца в среднем составил 362 кг/га. Внесение фосфорно-калийных удобрений способствовало увеличению данного показателя до 477 кг/га (прирост 32 %). На повышение сбора сырого протеина у костреца значительно повлияло применение полного минерального удобрения с различными дозами азота. Так, использование азота в дозе (N_1) кг/га действующего вещества в составе NPK увеличило сбор сырого протеина на 459, 249 и 326 кг/га, применение N_2 – на 596, 342 и 459 кг/га и N_3 – на 650, 424 и 719 кг/га соответственно от III к V ротации севооборота по сравнению с контрольными вариантами.

Закключение. В условиях Республики Мордовия использование минеральных удобрений в посевах многолетних трав предусматривает возделывание люцерны на черноземе выщелоченном с внесением фосфорно-калийных удобрений, что обеспечивает повышение урожайности на 0,68–1,25 т/га сухого вещества при окупаемости 1 кг д. в. удобрения сеном – 5,3–10,8 кг и дополнительным доходом 1,18–1,46 руб/руб.

При возделывании костреца внесение полного минерального удобрения с дозой N_{30-90} обеспечивает повышение продуктивности на 1,5–2,8 т/га сухого вещества, в 3,7 раза окупаемости 1 кг д. в. минеральных удобрений по сравнению с РК-вариантом и дополнительным доходом от 1,15 до 1,29 руб/руб. Полное минеральное удобрение увеличивало содержание сырого протеина в зеленой массе костреца в отдельные годы от 8 до 28 %, у люцерны на 2–3 % по сравнению с РК-вариантом. Внесение фосфорно-калийных удобрений и полного минерального способствовало росту сбора сырого протеина у люцерны на 11–24 и 18–38 %, костреца – на 21–44 и 61–211 %.

Список литературы

1. Дронова Т. Н., Бурцева Н. И., Молоконцева Е. И. Научные результаты исследований по многолетним травам. Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее образование. 2017;(3(47)): 46–56. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30021419> EDN: ZGYXVP
2. Ekschmitt K., Vetter S., Liu M., Fox O., Wolters V. Strategies used by soil biota to overcome soil organic matter stability-Why is dead organic matter left over in the soil? Geoderma. 2005;128(1-2):167–176. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.12.024>
3. Иванов И. С., Шатский И. М., Горшков А. В., Лабинская Р. М., Сапрыкина Н. В., Острикова М. Г. Итоги и перспективы работы Воронежской опытной станции по многолетним травам в области селекции, семеноводства и кормопроизводства. Многофункциональное адаптивное кормопроизводство: сб. научн. тр. М.: Угрешская типография, 2016. Вып.10 (58). С. 47–55.
4. Мерзлая Г. Е., Понкратенкова И. В. Эффективность органоминеральных систем удобрения. Плодородие. 2016;2(89):25–27. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26194620> EDN: WBFQJL
5. Халилов С. А. Влияние минеральных удобрений на урожайность и качество зеленой массы люцерны. Аграрная наука. 2019;(6):52–54. DOI: <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2019-329-6-52-54> EDN: HXDOKA
6. Казарина А. В., Марункова Л. К. Влияние режима питания на продуктивность люцерны в условиях Самарского Заволжья. Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2017;(12):101–105. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32305943> EDN: YMGQSK
7. Горковенко Л. Г., Бедило Н. А., Ригер А. Н., Осечкий С. И. К вопросу о целесообразности удобрения азотом фуражных посевов люцерны на Кубани. Сборник научных трудов Краснодарского научного центра по зоотехнии и ветеринарии. 2015;4(2):48–53. Режим доступа: <https://elibrary.ru/unqauf> EDN: UNQAUF
8. Чухиль А. А., Сафонова Т. Г. Потребление растениями люцерны элементов минерального питания при внесении макроудобрений. Научный журнал КубГАУ. 2016;(118):723–735. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25983937> EDN: VWPTTX
9. Барашкова Н. В., Неустроева Е. Р., Устинова В. В., Слепцова Н. А. Влияние стимуляторов роста на видовой состав и урожайность люцерно-кострецовой травосмеси в условиях среднетаежной подзоны Якутии. Вестник КрасГАУ. 2019;(10):41–48. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41267455> EDN: SQFDBJ
10. Прокина Л. Н. Влияние средств химизации на кормовую продуктивность люцерны и костреца в полевом севообороте. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2017;(5):21–27. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30008770> EDN: ZGRSSP
11. Новый прием комплексного использования минеральных удобрений и жидкого минерального удобрения Форсаж (микро) в посевах многолетних трав. Ресурсосберегающие экологически безопасные технологии производства и переработки сельскохозяйственной продукции: мат-лы XIV Междунар. научно-практ. конф. Саранск: изд-во Национального исследовательского Мордовского ГУ им. Н. П. Огарева, 2020. С. 335–339. Режим доступа: https://mrsu.ru/upload/iblock/3a6/2020_16-Lapshinskije-chteniya_ISBN.pdf

12. Петрина О. В., Овсянников Ю. А. Обоснование необходимости изучения новых видов люцерны, пригодных для выращивания в условиях Среднего Урала. Вестник биотехнологии. 2021;(4(29)):5.
Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48089054> EDN: EXPGUP

References

1. Dronova T. N., Burtseva N. I., Molokontseva E. I. The results of work with perennial grasses. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee obrazovanie*. 2017;(3(47)):46–56. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30021419>
2. Ekschmitt K., Vetter S., Liu M., Fox O., Wolters V. Strategies used by soil biota to overcome soil organic matter stability-Why is dead organic matter left over in the soil? *Geoderma*. 2005;128(1-2):167–176. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.12.024>
3. Ivanov I. S., Shatskiy I. M., Gorshkov A. V., Labinskaya R. M., Saprykina N. V., Ostrikova M. G. The results and prospects of the Voronezh experimental station for perennial herbs in the field of breeding, seed production and feed production. Multifunctional adaptive feed production: collection of scientific articles. Moscow: *Ugreshskaya tipografiya*, 2016. Iss.10 (58). pp. 47–55.
4. Merzlaya G. E., Ponkratenkova I. V. Efficiency of organomineral fertilizing systems. *Plodorodie*. 2016;2(89):25–27. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26194620>
5. Khalilov S. A. Influence of mineral fertilizers on yield and quality of green mass of alfalfa. *Agrarnaya nauka = Agrarian science*. 2019;(6):52–54. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2019-329-6-52-54>
6. Kazarina A. V., Marunkova L. K. The effect of diet on productivity of alfalfa in the conditions of Samara Trans-Volga region. *Mezhduna-rodnnyy zhurnal gumanitarnykh i estestvennykh nauk = International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2017;(12):101–105. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32305943>
7. Gorkovenko L. G., Bedilo N. A., Riger A. N., Osetskii S. I. To the problem of feasibility of nitrogen fertilizer for forage alfalfa in Kuban. *Sbornik nauchnykh trudov Krasnodarskogo nauchnogo tsentra po zootekhnii i veterinarii*. 2015;4(2):48–53. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/unqauf>
8. Chukhil A. A., Safonova T. G. Consumption of elements of mineral nutrients by alfalfa plants when using fertilizers. *Nauchnyy zhurnal KubGAU*. 2016;(118):723–735. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25983937>
9. Barashkova N. V., Neustroeva E. R., Ustinova V. V., Sleptsova N. A. The influence of growth stimulator on specific structure and productivity of alfalfa and awnless brome grass mix in the conditions of middle-taiga subzone of Yakutia. *Vestnik KrasGAU = The Bulletin of KrasGAU*. 2019;(10):41–48. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41267455>
10. Prokina L. N. Influence of chemistry means on fodder productivity of alfalfa and brome grasses in field crop rotation. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka = Agricultural Science Euro-North-East*. 2017;(5):21–27. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30008770>
11. A new method of complex use of mineral fertilizers and liquid mineral fertilizer Forsahz (micro) in crops of multi-year grasses. Resource-saving environmentally safe technologies for the production and processing of agricultural products: Proceedings of the XIV International Scientific and Practical Conference. Saransk: *izd-vo Natsional'nogo issledovatel'skogo Mordovskogo GU im. N. P. Ogareva*, 2020. pp. 335–339. URL: https://mrsu.ru/upload/iblock/3a6/2020_16-Lapshinskie-chteniya_ISBN.pdf
12. Petrina O. V., Ovsyannikov Yu. A. Substantiation of the need to study new alfalfa species suitable for cultivation in the conditions of the Middle Urals. *Vestnik biotekhnologii = Bulletin of biotechnology*. 2021;(4(29)):5. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48089054>

Сведения об авторах

✉ **Прокина Людмила Николаевна**, кандидат с.-х. наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией агрохимии, Мордовский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – филиал ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудниченко», д. 5, ул. Мичурина, р. п. Ялга, г. Саранск, Республика Мордовия, Российская Федерация, 430904, e-mail: niish-mordovia@mail.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0376-7031>

Пугов Сергей Васильевич, кандидат биол. наук, старший научный сотрудник лаборатории агрохимии, Мордовский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – филиал ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудниченко», д. 5, ул. Мичурина, р. п. Ялга, г. Саранск, Республика Мордовия, Российская Федерация, 430904, e-mail: niish-mordovia@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8421-2913>

Information about the authors

✉ **Lyudmila N. Prokina**, PhD in Agricultural Science, leading researcher, Head of the Laboratory of Agricultural Chemistry, Mordovia Research Agricultural Institute – branch of Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky, 5, Michurin str., Yalga, Saransk, Republic of Mordovia, Russian Federation, 430904, e-mail: niish-mordovia@mail.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0376-7031>

Sergey V. Pugov, PhD in Biology, senior researcher, the Laboratory of Agricultural Chemistry, Mordovia Research Agricultural Institute – branch of Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky, 5, Michurin str., Yalga, Saransk, Republic of Mordovia, Russian Federation, 430904, e-mail: niish-mordovia@mail.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8421-2913>

✉ – Для контактов / Corresponding author



Экологические режимы мелиорированных земель в Новгородской области

© 2024. О. В. Балун ✉

ФГБУН «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр
Российской академии наук», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Исследования экологических режимов грунтовых вод и запасов влаги проводили в Новгородской области в 2014–2023 гг. в условиях засушливых ($ГТК = 0,9...1,1$) и влажных вегетационных периодов ($ГТК = 1,69...2,46$) на дерново-подзолистых глееватых суглинистых почвах, осушаемых конструкциями закрытого дренажа: мелкого с глубиной заложения дрен 70 см; двух вариантов среднезаглубленного с глубиной заложения дрен 110 см с засыпкой дренажной траншеи древесной щепой и песчано-гравийной смесью (ПГС); двухъярусного, состоящего из нижнего яруса трубчатых дрен глубиной 110 см и перпендикулярного ему верхнего яруса бесполостных дрен, расположенного на глубине 60 см. Анализ характера изменения уровня грунтовых вод (УГВ) показал, что минимальная глубина грунтовых вод как во влажные, так и в сухие годы наблюдалась в начале вегетационного периода, второй пик подъема грунтовых вод во влажные годы отмечался в августе, в сухие годы – отсутствовал. Самый высокий среднесезонный УГВ наблюдали в избыточно влажном 2017 году ($ГТК = 2,46$) в вариантах среднезаглубленного дренажа с засыпкой щепой (30 см) и мелкого дренажа (33 см), самый низкий – в варианте двухъярусного дренажа (58 см). Анализ режимов влажности на опытных системах показал, что при мелком дренаже во влажный год более трети, а в избыточно влажный – более 2/3 продолжительности вегетационного периода верхний 30-сантиметровый горизонт находился в переувлажненном состоянии, а при двухъярусном дренаже периоды избыточного увлажнения отсутствовали. В то же время во влажные годы вероятность периодов с недостаточной влажностью почвы составляла от 8 % (при среднезаглубленном с ПГС дренаже) до 25 % (при двухъярусном дренаже). В засушливые годы в верхнем почвенном горизонте в варианте двухъярусного дренажа около 70 % ощущался недостаток влаги, в остальных вариантах это значение было немного ниже (62–65 %). Сформировавшиеся под влиянием двухъярусного дренажа в современных климатических условиях экологические режимы почвы оказали существенное влияние на урожайность сена многолетних трав (70 % злаковых), что позволило получить прибавку урожая в среднем 0,9 т/га относительно варианта с мелким дренажем как во влажные, так и сухие периоды вегетации.

Ключевые слова: уровень грунтовых вод, влажность почвы, закрытый дренаж, метеорологические условия, урожайность

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания ФГБНУ «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (тема № FFZF-2022-0010, рег. № НИОКР 122041100104-6).

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

Конфликт интересов: автор заявила об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Балун О. В. Экологические режимы мелиорированных земель в Новгородской области. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2024;25(3):435–443. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.3.435-443>

Поступила: 05.04.2024

Принята к публикации: 27.05.2024

Опубликована онлайн: 26.06.2024

Ecological regimes of reclaimed lands in the Novgorod region

© 2024. Olga V. Balun ✉

St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences,
Saint-Petersburg, Russian Federation

Studies of the ecological regimes of groundwater and moisture reserves were carried out in the Novgorod Region in 2014–2023 in conditions of arid ($HTC\ 0.9...1.1$) and wet vegetation periods ($HTC\ 1.69...2.46$) on sod-podzolic loamy soils drained by closed drainage structures: shallow with a depth of 70 cm; two variants of a medium-deep drainage with a depth of 110 cm with filling of the drainage trench with wood chips and sand-gravel mixture; two-tiered, consisting of a lower tier of tubular drains with a depth of 110 cm and an upper tier of tubeless drains perpendicular to it, located at a depth of 60 cm. Analysis of the nature of changes in the groundwater level showed that the minimum depth of groundwater in both wet and dry years was observed at the beginning of the growing season, the second peak of groundwater rise in wet years was observed in August, in dry years it was absent. The highest average seasonal groundwater level was observed in excessively humid 2017 ($HTC = 2.46$) in the variants of medium-deep drainage with backfilling of chips (30 cm) and shallow drainage (33 cm), the lowest – in the variant of two-tier drainage (58 cm). Analysis of humidity regimes on experimental systems showed that with shallow drainage in a humid year, more than a third, and in an excessively humid year, more than 2/3 of the duration of the growing season, the upper 30-centimeter horizon was in a waterlogged state, and with two-tier drainage, there were no periods of excessive moisture. At the same time, in wet years, the probability of periods with insufficient soil moisture ranged from 8 % (with medium-deep drainage with sand-gravel mixture) to 25 % (with two-tier drainage). In dry years, there was a lack of moisture in the upper soil horizon in the two-tier drainage variant of about 70 %, in other variants this value was slightly lower (62–65 %). The ecological soil regimes formed under the influence of two-tier drainage in modern climatic conditions had

a significant impact on the hay yield of perennial grasses (70 % of fodder cereals), which allowed for an average yield increase of 0.9 t/ha relative to the variant with shallow drainage during both wet and dry growing seasons.

Keywords: groundwater level, soil moisture, closed drainage, meteorological conditions, productivity

Acknowledgements: the work was carried out under the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of the St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (theme No. FFZF-2022-0010).

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

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

For citation: Balun O. V. Ecological regimes of reclaimed lands in the Novgorod region. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2024;25(3):435–443. (In Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.3.435-443>

Received: 05.04.2024

Accepted for publication: 27.05.2024

Published online: 26.06.2024

Новгородская область, как и вся территория Северо-Запада России, относится к зоне избыточного увлажнения с большим количеством болот и заболоченных территорий. Главной причиной переувлажнения земель являются особенности рельефа и наличие тяжелых слабоводопроницаемых почв. Основным мероприятием по ликвидации избыточной увлажненности и созданию благоприятных экологических режимов таких почв является осушение [1, 2, 3]. В середине XIX столетия в России для осушения земель начали использовать закрытый дренаж [4].

Под влиянием дренажа происходит изменение экологических режимов грунтовых вод, водно-воздушного и, как следствие, питательного режима [5, 6, 7]. На режим влажности почв оказывает влияние как степень увлажненности года (сухой, нормальный, влажный), так и вид дренажа. В работе И. В. Ковалева отмечено, что при осушении глееватых почв пластмассовый бестраншейный дренаж обеспечивает более интенсивный отвод гравитационной влаги из почвенного профиля по сравнению с траншейным гончарным дренажем, особенно в критические периоды весной и осенью [8]. Проведенные в Мичуринском аграрном университете исследования показали, что влажность почвы является основополагающим фактором в обеспеченности растений питательными веществами [9]. Изучение влажности осушаемых земель в Калининградской области подтвердило связь гидроморфизма почв с урожайностью выращиваемых сельскохозяйственных культур [10]. На экологические режимы осушаемых земель большое влияние оказывают климатические условия, которые претерпевают значительные перемены в последние десятилетия. Изменения климата на Северо-Западе России привели к увеличению количества осадков, поэтому существующие дренажные системы не справляются с отводом избыточной влаги из почвы [11]. В отдельные

периоды, когда испарение с поверхности почвы превышает количество выпавших осадков, в почве может ощущаться недостаток влаги. Данную проблему в Калининградской области предлагается решать за счет использования шлюзов-регуляторов на каналах и различных специальных устройств на устьях закрытых осушительных систем [12]. В Западной Сибири изменения климата привели к оптимизации влажности почвы и уменьшению амплитуды колебаний влагозапасов от года к году [13].

Анализ метеорологической информации показал, что в Новгородской области гидротермический коэффициент за последние 60 лет в среднем составил 1,39, что свидетельствует об оптимальной степени увлажненности. Однако из рассматриваемого временного периода 25 лет (40 %) были засушливыми, 19 лет (31 %) – оптимально влажными и 18 лет (29 %) – избыточно влажными [14, 15].

Цель исследований – получение новых знаний по формированию экологических режимов земель в условиях засушливых и влажных вегетационных периодов, осушаемых различными конструкциями закрытого дренажа.

Научная новизна – получение новых данных о работе закрытых осушительных систем в годы с различной влагообеспеченностью.

Материал и методы. Исследования проводили в Новгородском районе Новгородской области в 2014–2023 гг. на опытно-производственном участке, занятом старосеяным сенокосом из злаковых трав (овсяница луговая, лисохвост луговой, тимофеевка луговая – 70 %) и разнотравья (30 %). Оценка экологических режимов велась в условиях экстенсивного режима использования посева многолетних трав при ежегодном одноукосном скашивании. Подкормки минеральными удобрениями не проводились.

Агрометеорологические условия периода наблюдений представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Метеорологические условия периода наблюдений /
Table 1 – Meteorological conditions of the observation period

Год / Year	Средне- годовая темпера- тура, °C / Average annual tempe- rature, °C	Годовая сумма осадков, мм / Annual precipi- tation, mm	Сумма температур / Sum of temperatures		Сумма осадков / Amount of precipitation		ГТК ¹ / HTC hydrother- mal coefficient
			выше 5 °C / greater than 5 °C	выше 10 °C / greater than 10 °C	за вегета- ционный период с t>5 °C / during the grow- ing season t>5 °C	за период с t>10 °C /for a period with temperatures above 10 degrees	
2014	7,2	807	2988	2422	512	398	1,64
2015	7,3	569	2600	2311	307	206	0,89
2016	6,4	416	2737	2408	568	416	1,73
2017	5,8	885	2340	2073	671	510	2,46
2018	6,1	543	2861	2501	375	274	1,10
2019	6,8	821	2636	2231	489	392	1,76
2020	7,7	587	2692	2305	370	253	1,02
2021	5,8	817	2795	2441	563	468	1,92
2022	6,2	525	2665	2320	322	232	1,00
2023	6,5	701	2801	2427	357	241	0,99
Среднемо- голетнее / Average long-term	5,7	605	2683	2357	432	339	1,44

Среднегодовые температуры превышали норму на 0,1–2,0 °C, и в среднем за десятилетие годовая температура была выше нормы на 0,9 °C. Годовое количество осадков в 2016 году выпало на 189 мм ниже нормы, в 2017 году – на 280 мм выше нормы и в среднем за период исследований превысило норму на 62 мм. В целом климатические условия последнего десятилетия (2014–2023 гг.) отличались большой экстремальностью: 5 лет сухих (ГТК = 0,9...1,1) и 5 лет избыточно влажных (ГТК = 1,64...2,46). Экстремально влажным за последний 60-летний период наблюдений выделился 2017 г. (ГТК = 2,46).

Участок расположен на типичных дерново-подзолистых глееватых суглинистых почвах, слабоводопроницаемых с коэффици-

ентом фильтрации 0,01–0,002 м/сут (по ГОСТ 23278-2014²), плотностью пахотного горизонта 1,3 г/см³, подпахотного – 1,61 г/см³, плотностью твердой фазы – 2,6 и 2,7 г/см³, полной влагоемкостью 35 и 25 %, капиллярной влагоемкостью 29 и 20 %, коэффициентом пористости – 0,5 и 0,4 соответственно (выполнены методами, изложенными в методических указаниях³). Почвы кислые – pH_{KCl} = 5,2, содержание гумуса по Тюрину (ГОСТ 26213-91⁴) – среднее (4,7 %), подвижных форм фосфора и калия по Кирсанову (ГОСТ Р 54650-2011⁵) – среднее (56 и 85 мг/кг почвы соответственно). Тип водного питания – атмосферный, переувлажнение участка происходит за счет сезонных почвенных вод.

Схема опыта по изучаемым конструкциям закрытого дренажа представлена в таблице 2.

¹Агрометеорология: учебник. СПб.: ООО «КВАДРО», 2012. 368 с.

²ГОСТ 23278-2014. Грунты. Методы полевых испытаний проницаемости. М.: Стандартинформ, 2015. 35 с.
URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200116024?ysclid=lwotb994co236049839>

³Методические указания по проведению исследований в длительных опытах с удобрениями. Ч. 2. (Программа и методы исследования почв). Под общ. ред. акад. ВАСХНИЛ В. Д. Панникова. М., 1983. С. 13–19.

⁴ГОСТ 26213-91. Почвы. Методы определения органического вещества. М.: изд-во стандартов, 1992. 8 с.
URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200023481?ysclid=lwot93dtpq202384090>

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?ysclid=lwotfbj7u220347596>

Таблица 2 – Схема опыта /
Table 2 – The scheme of the experiment

Вариант / Variant	Описание конструкции закрытого дренажа / Description of the closed drainage structure
1	Мелкий дренаж с глубиной заложения дрен 70 см / Shallow drainage with depth of 70 cm
2	Среднезаглубленный дренаж (глубина заложения дрен 110 см) с засыпкой дренажной траншеи древесной щепой / Medium-deep drainage (drainage depth 110 cm) with filling of the drainage trench with wood chips
3	Среднезаглубленный дренаж (глубина заложения дрен 110 см) с засыпкой песчано-гравийной смесью (ПГС) / Medium-deep drainage (drainage depth 110 cm) with backfilling with sand-gravel mixture (PGS)
4	Двухъярусный дренаж, состоящий из нижнего яруса дрен на глубине 110 см и верхнего яруса бесполостных дрен с глубиной заложения 60 см, перпендикулярного нижнему, с колонками из ПГС в местах пересечения ярусов / Two-tier drainage consisting of a lower tier of drains at a depth of 110 cm and an upper tier without drainage pipes with a depth of 60 cm, perpendicular to the lower one, with columns made of PGS at the intersection of the tiers

Режим влажности почвы и уровня грунтовых вод определяли по методике Северного научно-исследовательского института гидротехники и мелиорации (Сев НИИГиМ)⁶.

Для определения уровня грунтовых вод (УГВ) в каждом варианте опыта в середине между дренами были установлены по 2 скважины. Наблюдения проводили 1 раз в 5 дней. Влажность почвы определяли послойно через 10 см термостатно-весовым методом 1 раз в декаду.

Результаты и их обсуждение. Осушительная система направлена на отвод избыточных вод из корнеобитаемого слоя почвы с целью снижения УГВ. Режим грунтовых вод в вариантах закрытого дренажа в среднем по избыточно-влажным годам последнего десятилетия (влажный период), которыми были

2014, 2016, 2017, 2019, 2021 гг., представлен на рисунке 1.

Во влажные годы УГВ находился на минимальном расстоянии от поверхности земли в начале мае и конце августа и на максимальном – в конце июня. Самый высокий УГВ наблюдали в варианте мелкого дренажа (№1), самый низкий – двухъярусного дренажа (№4). Разница УГВ в данных вариантах в отдельные периоды составила более 30 см.

Наиболее показательной работа осушительных систем отмечена в экстремально влажный 2017 год (рис. 2). В течение всего вегетационного периода в двух вариантах осушительных систем – мелком дренаже и стандартном с засыпкой дренажной траншеи щепой – УГВ находился на достаточно высоком уровне: 20–40 см от поверхности земли.

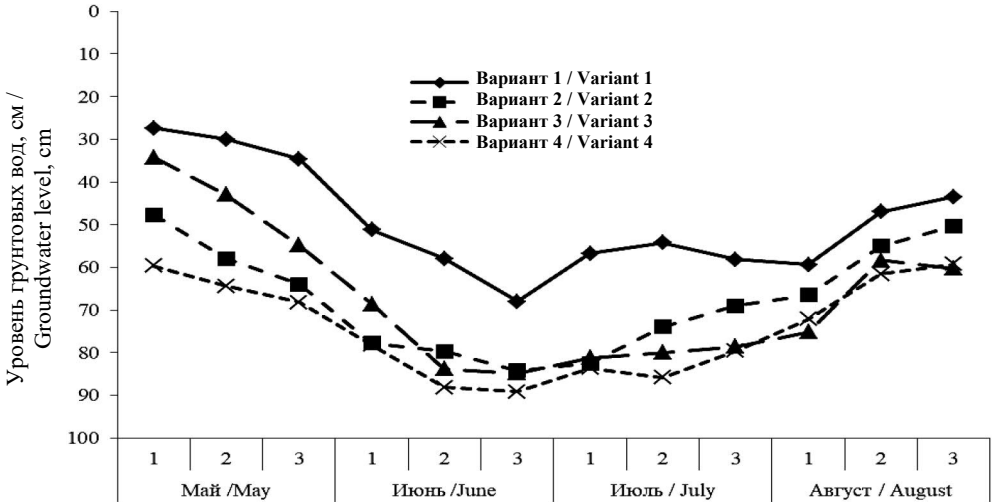


Рис. 1. Уровни грунтовых вод на осушительных системах закрытого дренажа во влажный период, среднее за 5 лет (обозначение вариантов в табл. 2) /

Fig. 1. Groundwater levels on drainage systems of closed drainage in the wet period, average for 5 years (designation of variants in Table 2)

⁶Методические указания по постановке и проведению опытов на осушительных системах. Л., 1983. С. 54–69, 84–103.

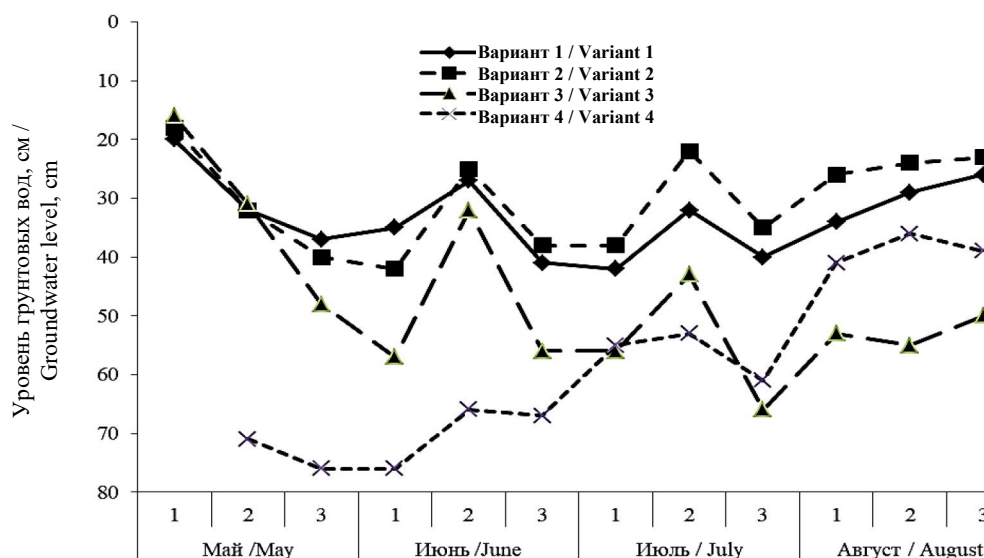


Рис. 2. Уровни грунтовых вод на осушительных системах закрытого дренажа в экстремально влажном 2017 г. (обозначение вариантов в табл. 2) /

Fig. 2. Groundwater levels on drainage systems of closed drainage in extremely humid 2017 (designation of variants in Table 2)

В течение вегетационного периода 2017 года отмечено три пика подъема грунтовых вод: в середине июня, во второй декаде июля и в августе после выпадения интенсивных дождей. Самый значительный пик подъема грунтовых вод наблюдали в середине июня на системах мелкого и стандартного дренажа с засыпкой ПГС (№3), в середине июля – стандартного дренажа со щепой (№2) и в середине августа – двухъярусного дренажа (№4). За сезон 2017 года среднее значение УГВ было самым высоким в вариантах мелкого (№1) и стандартного дренажа со щепой (№2) – 33 и 30 см соответственно. В варианте дренажа с засыпкой ПГС

(№3) его значение составило 47 см, двухъярусного (№4) – 58 см. Максимальная скорость сработки грунтовых вод (2,3 см/сут) отмечена в варианте осушителей с засыпкой дренажной траншеи ПГС (№3), минимальная (0,8 см/сут) – в варианте мелкого дренажа (№1).

В засушливые годы 2015, 2018, 2020, 2022, 2023 гг. (сухой период) самый высокий УГВ на начало мая (35 см) наблюдали в вариантах мелкого дренажа (№1), самый низкий (62 см) – с засыпкой щепой (№2), в вариантах двухъярусного дренажа (№4) и с засыпкой ПГС (№3) в среднем за пять лет составил 52 см (рис. 3).

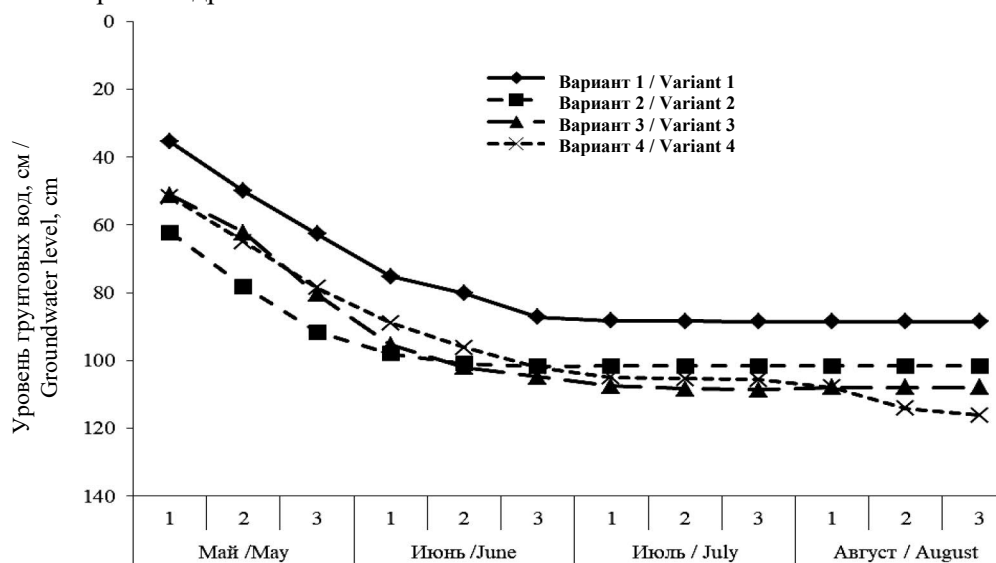


Рис. 3. Уровни грунтовых вод на осушительных системах закрытого дренажа в сухой период, среднее за 5 лет (обозначение вариантов в табл. 2) /

Fig. 3. Groundwater levels on drainage systems of closed drainage in the dry period, average for 5 years (designation of variants in Table 2)

В течение сухого вегетационного периода на осушительных системах происходит быстрое снижение уровня грунтовых вод до критических значений, при которых они перестают участвовать в обеспечении пахотного горизонта влагой, что при отсутствии осадков приводит к засухе. Оптимальное значение УГВ на сенокосах составляет 60–80 см. Наиболее интенсивно грунтовые воды снижались в мае: в этот период скорость сработки УГВ составила от 1,4 см/сут (вариант мелкого дренажа №1) до 1,5 см/сут (варианты среднезаглубленного дренажа №2 и №3). На оптимальной глубине 60 см грунтовые воды находились: с начала вегетации в варианте стандартного дренажа со щепой (№2), со 2-й декады мая – в вариантах двухъярусного (№4) и стандартного дренажа с ПГС (№3), с 3-й декады мая – в варианте мелкого дренажа (№1).

Эффективность работы осушительной системы принято оценивать по норме осушения – минимальному расстоянию от дневной поверхности до уровня грунтовых вод, обеспечивающему в корнеобитаемом слое благоприятный для растений водно-воздушный режим. Одной из важнейших характеристик водно-воздушного режима является влажность почвы. Основная масса корней растений на дерново-подзолистой почве расположена в верхнем гумусовом горизонте. Поэтому режим влажности в верхнем 30-сантиметровом горизонте является наиболее значимым. На опытных участках в данном слое почвы оптимальный запас влаги находится в пределах 85–120 мм. В среднем за 5 влажных лет запас влаги был избыточным в течение первых двух декад мая в варианте мелкого дренажа (№1), в первой декаде мая – в варианте стандартного дренажа с засыпкой древесной щепой (№2) (табл. 3). В целом в данных вариантах в течение вегетационного периода запас влаги уменьшался в июне-июле, а в августе при увеличении осадков на фоне понижения температур – увеличивался.

Таблица 3 – Запас влаги в слое почвы 0–30 см, мм /
Table 3 – Moisture reserve in the soil layer 0–30 cm, mm

Период / Period	Вариант / Variant	Месяц / Month												Среднее / Average
		май / may			июнь / june			июль / july			август / august			
		декада / decade												
		I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	
Влажный / Wet	1	154	127	119	102	107	98	101	101	92	107	118	109	111
	2	126	112	110	99	102	87	98	101	93	100	107	109	104
	3	113	103	102	90	86	86	90	92	80	88	104	98	94
	4	106	86	98	84	92	95	88	83	81	89	99	94	91
Избыточно влажный – 2017 г. / Excessively humid – 2017	1	162	148	134	121	142	128	148	116	96	119	152	137	134
	2	162	139	134	128	154	108	123	127	119	124	123	157	133
	3	134	126	109	92	108	113	106	113	100	124	111	108	112
	4	114	78	87	96	105	93	104	101	86	88	94	104	96
Сухой / Dry	1	131	123	101	94	66	66	62	57	61	54	55	56	77
	2	122	104	95	73	73	67	69	63	69	65	70	64	78
	3	115	101	79	65	64	50	58	53	64	56	51	51	67
	4	104	96	80	69	67	56	66	59	66	63	59	59	70

Примечание. Описание вариантов закрытого дренажа дано в табл. 2. / Note. A description of the variants for closed drainage is given in Table 2.

Анализ запасов влаги по вариантам показал, что вероятность нахождения верхнего слоя почвы в переувлажненном состоянии составила: от 0 % – на системах двухъярусного дренажа (№4) до 37 % – мелкого дренажа (№1). В то же время во влажные годы вероятность периодов с недостаточной влажностью почвы составила от 8 % (вариант среднезаглубленного с ПГС дренажа, №3) до 25 % (варианты двухъярусного дренажа, №4).

Важную роль при анализе эффективности осушительных систем в создании благоприятных экологических режимов влажности на мелиорированных землях играет их работа в экстремально влажный год, каким был 2017, когда за вегетационный период выпало 448 мм осадков при норме 258 мм. Динамика влажности показала, что благоприятный водно-воздушный режим обеспечили системы двухъярусного (№4) и среднезаглубленного с засыпкой ПГС (№3) дренажа. На землях, осушаемых мелким (№1) и среднезаглубленным дренажем с засыпкой щепой (№2), примерно в течение

105 суток (или 85 % длительности вегетационного периода) наблюдали избыток влаги.

В засушливые годы в верхнем почвенном горизонте в варианте двухъярусного дренажа (№4) около 70 % времени наблюдался недостаток влаги, на остальных вариантах это значение было незначительно ниже (62–65 %). Но во всех вариантах в засушливые годы в первой декаде мая наблюдали избыток влаги: на мелком дренаже (№1) – в течение 4 лет, в остальных вариантах – по одному году, во второй декаде – в варианте мелкого дренажа (№1) – в течение 2 лет, двухъярусного (№4) и среднезаглубленного со щепой (№2) – по 1 году.

Режим влажности почвы оказывает влияние на урожайность выращиваемых сельскохозяйственных культур. На опытных участках в течение последнего десятилетия выращивались многолетние травы на сено. Учет урожая проводили в третьей декаде июня. Максимальная урожайность сена в среднем как в сухой, так и во влажный период получена в варианте двухъярусного дренажа (№4) (3,1 и 2,9 т/га соответственно), минимальная (2,2 и 2,0 т/га) – в варианте мелкого дренажа (№1) (табл. 4).

Таблица 4 – Урожайность сена многолетних трав, т/га /
Table 4 – Hay yield of perennial grasses, t/ha

Период (А) / Period (A)	Вариант (В) / Variant (B)	2014 г.	2016 г.	2017 г.	2019 г.	2021 г.	Среднее / Average
Влажный / Wet	1	2,3	1,6	2,5	1,9	1,8	2,0
	2	2,4	1,6	2,5	2,8	3,2	2,5
	3	2,3	1,3	2,0	2,1	2,4	2,0
	4	4,1	1,7	3,9	1,8	2,9	2,9
Сухой / Dry	Вариант (В) / Variant (B)	2015 г.	2018 г.	2020 г.	2022 г.	2023 г.	Среднее / Average
	1	1,5	2,1	3,3	2,1	1,9	2,2
	2	2,2	3,2	3,3	3,0	3,2	3,0
	3	1,1	1,9	4,2	2,3	3,6	2,6
	4	2,6	3,2	3,9	2,7	2,9	3,1
НСР ₀₅ (В) / LSD ₀₅ (B)							0,85

Отмечено, что урожайность сена многолетних трав в сухой период была несколько выше, чем во влажный, но существенного влияния степени увлажнения периода (фактор А) на продуктивность мелиорированных земель выявлено не было.

Средние запасы влаги в верхнем 30-сантиметровом горизонте почвы в период от начала вегетации до уборки урожая многолетних трав варьировали от 83 мм в варианте двухъярусного дренажа в сухой период до 122 мм

– в варианте мелкого дренажа во влажный период, т. е. находились примерно в оптимальных пределах. Зависимость средней за пятилетний период урожайности сена (У, т/га) от среднего запаса влаги в данный период (х, мм) имеет вид:

$$У = -0,024х + 4,93; \quad r^2 = 0,51$$

и показывает, что урожайность сена многолетних трав на опытных участках с увеличением влажности – от нижнего предела оптимальной влажности почвы до верхнего – уменьшается.

Выводы:

- в последнее десятилетие XXI века в Новгородской области в связи с изменением климата увеличилась экстремальность степени увлажненности вегетационного периода: 5 лет – сухие и 5 лет – избыточно влажные;

- характер изменения УГВ во влажный период отличается наличием двух минимумов: в мае и августе, в сухой период – только в мае;

- более благоприятный режим грунтовых вод во влажные годы и самый низкий среднесезонный уровень грунтовых вод (74 см), в том числе и в экстремально-влажный год (58 см), наблюдали в варианте двухъярусного дренажа;

- системы двухъярусного дренажа во влажный период обеспечили своевременный сброс

избыточной влаги и, как следствие – отсутствие переувлажнения в пахотном горизонте почвы и наиболее благоприятный режим влажности, в том числе в экстремально-влажный год;

- в сухие годы режим влажности отличался продолжительным периодом с недостатком влаги в верхнем почвенном горизонте, который продолжался 75–85 суток в зависимости от конструкции дренажа;

- сформировавшиеся под влиянием двухъярусного дренажа в современных климатических условиях экологические режимы почвы оказали существенное влияние на урожайность сена многолетних трав, что позволило получить прибавку урожая в среднем 0,9 т/га относительно варианта с мелким дренажем.

Список литературы

1. Иванов А. И., Янко Ю. Г. Мелиорация как необходимое средство развития сельского хозяйства Нечерноземной зоны России. *Агрофизика*. 2019;(1):67–78. DOI: <https://doi.org/10.25695/AGRPH.2019.01.09> EDN: VWIUQU
2. Чесноков Ю. В., Янко Ю. Г. Проблемы осушения земель Ленинградской области. Мелиорация и водное хозяйство. 2019;(3):18–21. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39172657> EDN: UQJKMY
3. Valipour M., Krasilnikof J., Yannopoulos S., Kumar R., Deng J., Rocco P., Mays L., Grismer M. E., Angelakis A. N. The Evolution of Agricultural Drainage from the Earliest Times to the Present. *Sustainability*. 2020;12(1):416. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12010416>
4. Авдеев Э. А., Балун О. В. Из истории первого российского гончарного дренажа, заложенного на территории Новгородской области. *Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета*. 2011;(25):266–269.
5. Sofia G., Ragazzi F., Giandon P., Dalla Fontana G., Tarolli P. On the linkage between runoff generation, land drainage, soil properties, and temporal patterns of precipitation in agricultural floodplains. *Advances in Water Resources*. 2019;124:120–138. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2018.12.003>
6. Povilaitis A., Lamsodis R., Bastienė N., Rudzianskaitė A., Misevičienė S., Misekaitė O., Gužys S., Baigys G., Grybauskienė W., Balevičius G. Agricultural drainage in Lithuania: a review of practices and environmental effects. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B: Soil and Plant Science*. 2015;65(sup1):14–29. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/09064710.2014.971050>
7. Овчинникова М. Ф. Свойства и продуктивность дерново-подзолистых почв при длительном осушении в разных агроусловиях. *Плодородие*. 2019;(5(110)):34–37. DOI: <https://doi.org/10.25680/S19948603.2019.110.10> EDN: VEWQHD
8. Ковалев И. В. Осушенные почвы как аналог лизиметра большой площади. *Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение*. 2021;(3):52–61. Режим доступа: <https://msu-soil-journal.ru/articles/article/4478/>
9. Ряскова О. М., Зайцева Г. А. Влажность почвы как основной фактор, влияющий на свойства почв различных типов. *Наука и Образование*. 2021;4(3):59. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47197229> EDN: SJJPMI
10. Анциферова О. А. Изученность водного режима почв Калининградской области. *Известия КГТУ*. 2019;(53):11–24. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38212735> EDN: KCPSEB
11. Усков И. Б., Моисеев К. Г., Николаев М. В., Кононенко О. В., Усков А. О. Анализ системы «осадки-почва-дренаж» в условиях изменения климата на Северо-Западе России. *Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации*. 2020;(4(40)):205–226. DOI: <https://doi.org/10.31774/2222-1816-2020-4-205-226> EDN: IJNDOP
12. Пунтусов В. Г., Ерин А. А. Совершенствование реконструкции осушительных систем Калининградской области. *Вестник науки и образования Северо-Запада России*. 2022;8(1):25–29. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48407302> EDN: CDHUOQ
13. Тарасова Л. Л. Режим влажности почвы в земледельческих районах Западной Сибири как результат региональных проявлений изменения климата. *Труды Сибирского регионального научно-исследовательского гидрометеорологического института*. 2021;(107):122–125. DOI: https://doi.org/10.55235/0320359X_2021_107_122 EDN: TRZOSF
14. Балун О. В., Шкодина Е. П. Эффективность осушения в условиях изменения климата в Новгородской области. *Аграрный научный журнал*. 2023;(11):4–11. DOI: <https://doi.org/10.28983/asj.y2023i11pp4-11> EDN: AFUXBX
15. Gornyy V. I., Balun O. V., Kiselev A. V., Kritsuk S. G., Latypov I. Sh., Tronin A. A. Multiyear variations of soil moisture availability in the East European Plain. *Geography, Environment, Sustainability*. 2023;16(4):120–124. DOI: <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2023-2811>

References

1. Ivanov A. I., Yanko Yu. G. Melioration as an essential means for agriculture development in non-chernozem zone of Russia. *Agrofizika* = *Agrophysica*. 2019;(1):67–78. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.25695/AGRPH.2019.01.09>
2. Chesnokov Yu. V., Yanko Yu. G. Problems of land reclamation of the Leningrad region. *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo* = *Melioration and Water Management*. 2019;(3):18–21. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39172657>

3. Valipour M., Krasilnikov J., Yannopoulos S., Kumar R., Deng J., Roccaro P., Mays L., Grismer M. E., Angelakis A. N. The Evolution of Agricultural Drainage from the Earliest Times to the Present. *Sustainability*. 2020;12(1):416. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12010416>
4. Avdeev E. A., Balun O. V. From the history of the first Russian pottery drainage, laid on the territory of the Novgorod region. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = *Izvestiya Saint-Petersburg State Agrarian University*. 2011;(25):266–269. (In Russ.).
5. Sofia G., Ragazzi F., Giandon P., Dalla Fontana G., Tarolli P. On the linkage between runoff generation, land drainage, soil properties, and temporal patterns of precipitation in agricultural floodplains. *Advances in Water Resources*. 2019;124:120–138. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2018.12.003>
6. Povilaitis A., Lamsodis R., Bastienė N., Rudzianskaitė A., Misevičienė S., Miseckaitė O., Gužys S., Baigys G., Grybauskienė W., Balevičius G. Agricultural drainage in Lithuania: a review of practices and environmental effects. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B: Soil and Plant Science*. 2015;65(sup1):14–29. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/09064710.2014.971050>
7. Ovchinnikova M. F. Properties and productivity of soddy-podzolic soils under the impact of long-term drainage in different agrogeogenic conditions. *Plodородие*. 2019;(5(110)):34–37. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.25680/S19948603.2019.110.10>
8. Kovalev I. V. Drained soils as an analogue of a large area lysimeter. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17: Pochvovedenie* = *Lomonosov Soil Science Journal*. 2021;(3):52–61. (In Russ.). URL: <https://msu-soil-journal.ru/articles/article/4478/>
9. Ryaskova O. M., Zaytseva G. A. Dependence of food elements content in different types of soils on productive moisture reserves. *Nauka i Obrazovanie*. 2021;4(3):59. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47197229>
10. Antsiferova O. A. Study of the water regime of soil in the Kaliningrad region. *Izvestiya KGTU* = *KSTU News*. 2019;(53):11–24. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38212735>
11. Uskov I. B., Moiseev K. G., Nikolaev M. V., Kononenko O. V., Uskov A. O. Analysis of the “precipitation - soil - drainage” system under the conditions of climate change in the North-West of Russia. *Nauchnyy zhurnal Rossiyskogo NII problem melioratsii* = *Scientific Journal of Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems*. 2020;(4(40)):205–226. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31774/2222-1816-2020-4-205-226>
12. Puntusov V. G., Erin A. A. Improving the reconstruction of drainage systems in the Kaliningrad region. *Vestnik nauki i obrazovaniya Severo-Zapada Rossii*. 2022;8(1):25–29. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48407302>
13. Tarasova L. L. Soil moisture regime in agricultural areas of western Siberia as a result of regional climate change. *Trudy Sibirskogo regional'nogo nauchno-issledovatel'skogo gidrometeorologicheskogo instituta*. 2021;(107):122–125. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.55235/0320359X_2021_107_122
14. Balun O. V., Shkodina E. P. Dehumidification efficiency in the conditions of climate change in the Novgorod region. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal* = *The Agrarian Scientific Journal*. 2023;(11):4–11. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.28983/asj.y2023i11pp4-11>
15. Gornyy V. I., Balun O. V., Kiselev A. V., Kritsuk S. G., Latypov I. Sh., Tronin A. A. Multiyear variations of soil moisture availability in the East European Plain. *Geography, Environment, Sustainability*. 2023;16(4):120–124. DOI: <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2023-2811>

Сведения об авторе

✉ **Балун Ольга Васильевна**, кандидат техн. наук, доцент, старший научный сотрудник, Новгородский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – филиал ФГБУН «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (Новгородский НИИСХ – филиал СПб ФИЦ РАН), д.2, ул. Парковая, п/о Борки, Новгородский район, Новгородской обл., Российская Федерация, 173516, e-mail: info@spcras.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8476-0792>, e-mail: bov0001@mail.ru

Information about the author

✉ **Olga V. Balun**, PhD in Engineering, associate professor, senior researcher, Novgorod Research Agriculture Institute – Branch of St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, 2, str. Parkovaya, etc. Borkey, Novgorod district, Novgorod region, Russian Federation, 173516, e-mail: info@spcras.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8476-0792>, e-mail: bov0001@mail.ru

✉ – Для контактов / Corresponding author

КОРМОПРОИЗВОДСТВО: ПОЛЕВОЕ И ЛУГОВОЕ / FODDER PRODUCTION: FIELD AND MEADOW

<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.3.444-452>



УДК 633.282+57.017.64+631.552+631.52

Динамика содержания сухого вещества и протеина в зеленой массе суданской травы в зависимости от способа посева

© 2024. Н. А. Ковтунова✉, В. В. Ковтунов, А. Е. Романюкин, Е. А. Шишова, Н. С. Кравченко

ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской», г. Зерноград, Ростовская область, Российская Федерация

Недостаточная изученность особенностей изменения питательных веществ суданской травы по фазам роста и развития является одним из основных препятствий к широкому использованию этой культуры в кормопроизводстве. Цель исследований – провести анализ изменения содержания протеина и сухого вещества в зеленой массе сортов суданской травы в течение вегетации в зависимости от способа посева. Исследования проводили в Ростовской области на обыкновенном карбонатном черноземе. Вегетационные периоды характеризовались контрастным гидротермическим режимом: в 2022 г. – средней засушливостью, в 2021 и 2023 гг. – недостаточным увлажнением. Объект исследований – сорта суданской травы Александрина, Алиса, Грация, Кудесница селекции Аграрного научного центра «Донской». При рядовом способе посева (междурядье 15 см, норма высева 1,6 млн семян/га) в начале вегетации происходит более быстрое накопление сухого вещества у всех изучаемых сортов. К концу вегетации содержание сухого вещества выше при ширококормном посеве (междурядье 70 см, 340 тыс. семян/га), в среднем по сортам – на 4,21 %. Активное его накопление отмечено от конца фазы «выметывание» до фазы «молочная спелость». Содержание протеина в сухом веществе при ширококормном посеве в начале вегетации было в два раза выше, чем при сплошном и составило 21,33–24,17 %. Начиная с фазы «выметывание», величина признака резко снижалась и к полной спелости зерна составила при рядовом посеве 5,17–6,74 % и 8,01–8,61 % при ширококормном. Таким образом, на протяжении всей вегетации значение признака было выше при ширококормном способе посева. Такое изменение содержания протеина в сухом веществе зеленой массы указывает на целесообразность использования культуры на ранних этапах вегетации для получения наилучшего качества кормов.

Ключевые слова: *Sorghum × drummondii*, качество, сорт, вегетация, корма, накопление

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «АНЦ «Донской» (тема № 0505-2022-0003).

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Ковтунова Н. А., Ковтунов В. В., Романюкин А. Е., Шишова Е. А., Кравченко Н. С. Динамика содержания сухого вещества и протеина в зеленой массе суданской травы в зависимости от способа посева. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2024;25(3):444–452. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.3.444-452>

Поступила: 16.02.2024

Принята к публикации: 24.05.2024

Опубликована онлайн: 26.06.2024

Dynamics of dry matter content and protein percentage in green mass of Sudan grass depending on the sowing method

© 2024. Natalia A. Kovtunova✉, Vladimir V. Kovtunov, Aleksandr E. Romanyukin, Elena A. Shishova, Nina S. Kravchenko

Agricultural Research Center “Donskoy”, Zernograd, Rostov region, Russian Federation

Insufficient information on the characteristics of changes in nutrients of Sudan grass according to the phases of growth and development is one of the main obstacles to the widespread use of this crop in feed production. The purpose of the study is to analyze changes in the content of protein and dry matter in green mass of Sudan grass varieties during a vegetation period depending on the sowing method. The research was carried out in the Rostov region on ordinary carbonate chernozem. The growing seasons were characterized by a contrasting hydrothermal regime: in 2022 – average aridity, in 2021 and 2023. – insufficient hydration. The objects of the study were the Sudan grass varieties ‘Aleksandrina’, ‘Alisa’, ‘Gratsiya’, ‘Kudesnitsa’ bred by the Agricultural Research Center “Donskoy”. With the row sowing method (row spacing 15 cm, seeding rate 1.6 million pcs/ha), a more rapid accumulation of dry matter occurs in all studied varieties at the beginning of the vegetation period. By the end of the vegetation period, the dry matter content is higher with wide-row sowing (70 cm row spacing, 340 thousand pieces/ha), by 4.21% on average among the varieties. Rapid accumulation of dry matter was noted from the end of the “heading” phase up to the “milk ripeness” phase. The protein content in dry matter with wide-row sowing at the beginning of the growing season was two times higher than with continuous sowing and amounted to 21.33–24.17 %. Starting from

the “heading” phase, the value of the trait decreased sharply and by the time of full grain ripeness it was 5.17–6.74 % for row sowing and 8.01–8.61 % for wide-row sowing. This change in protein in the dry matter of green mass indicates the practicability of using the crop in early stages of the vegetation period to obtain the best feed quality.

Keywords: *Sorghum × drummondii*, quality, variety, vegetation, feed, accumulation

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 Agricultural Research Center “Donskoy” (theme No. 0505-2022-0003).

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

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

For citation: Kovtunova N. A., Kovtunov V. V., Romanyukin A. E., Shishova E. A., Kravchenko N. S. Dynamics of dry matter content and protein percentage in green mass of Sudan grass depending on the sowing method. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2024;25(3):444–452. (In Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.3.444-452>

Received: 16.02.2024

Accepted for publication: 24.05.2024

Published online: 26.06.2024

Суданская трава по кормовым качествам значительно превосходит все злаковые травы, дает нежное сено, зеленую массу, силос, сенаж, может использоваться на пастбищах и способна давать 2-3 укуса. Все эти качества в совокупности с высокой засухо-, жаростойкостью, солевыносливостью ставят ее в разряд лучших кормовых культур в засушливых регионах.

Задача селекционера любой сельскохозяйственной культуры – создание сортов и гибридов с высокой урожайностью [1, 2]. Однако именно питательная ценность сорта является необходимым условием для разработки мероприятий по созданию кормовой базы, расчету рациона с наиболее эффективным использованием кормов.

Содержание питательных веществ в урожае значительно изменяется в зависимости от срока посева и густоты стояния растений, внесения удобрений, метеорологических условий, почвы и других. Согласно ряду исследователей, фаза вегетации оказывает наиболее существенное влияние на химический состав, питательность и переваримость корма. По мере старения растений происходит увеличение содержания углеводов, лигнина, что снижает усвояемость питательных веществ [2, 3, 4]. Своевременное начало и окончание уборки позволяет получать корма более высокого качества. При задержке с уборкой теряется до 30 % кормовых единиц и 35 % протеина¹.

Так, лучший силос из суданской травы получается при уборке в фазу «молочно-восковая спелость». При силосовании в более ранние сроки и жаркую погоду в растениях образуется синильная кислота – силос получается горький, низкого качества [5].

Наилучшим сроком использования посевов суданской травы на выпас считается фаза

«выход в трубку», когда в растениях содержится наибольшее количество протеина. После фазы «выметывание» поедаемость суданской травы резко снижается.

Для сенажа и сена зеленую массу суданской травы следует убирать в фазу «начало выметывания». При задержке с уборкой ценность корма снижается. Согласно исследованиям В. И. Филатова, Е. В. Филатовой [6], корма из зеленой массы, убранной после цветения, по протеиновой ценности могут удовлетворить по потребности в энергии животных с продуктивностью до 4-5 тыс. кг за лактацию. Это не соответствует требованиям рынка, делая эти корма неконкурентоспособными. Установлено, что при уборке суданской травы в фазу «цветение» получена максимальная урожайность зеленой массы, однако качество корма в этот период значительно ниже [7, 8].

Недостаточная изученность особенностей изменения питательных веществ в зеленой массе суданской травы за период вегетации при различных способах посева является одним из основных препятствий к широкому использованию культуры в производстве, а также затрудняет планирование работ в кормопроизводстве.

Цель исследований – провести анализ изменения содержания протеина и сухого вещества в зеленой массе сортов суданской травы в течение вегетации в зависимости от способа посева.

Научная новизна – изучены основные показатели качества (содержание сухого вещества и сырого протеина) у новых сортов суданской травы и динамика накопления их в течение вегетации при посеве широко-рядным и сплошным способами в условиях недостаточного увлажнения.

¹Токарев В. С., Лисунова Л. И. Кормление сельскохозяйственных животных. Кормовые средства (характеристика и использование): учебно-методическое пособие для студентов по специальности «Ветеринарная медицина». Витебск: ВГАВМ, 2023. 195 с.

Материал и методы. Исследования проведены в 2021–2023 гг. на селекционном поле ФГБНУ «АНЦ «Донской» (г. Зерноград, Ростовская область). Почва – обыкновенный карбонатный чернозем (содержание гумуса 3,2 %², подвижного фосфора P_2O_5 – 10–40 мг/кг, обменного калия³ K_2O – 300–500 мг/кг почвы).

Метеоусловия в годы исследований (2021–2023 гг.) были контрастными: гидротермический коэффициент⁴ указывает на среднюю засушливость вегетационного периода в 2022 г. (ГТК = 0,52) и на недостаточное увлажнение в 2021 и 2023 гг. (ГТК – 0,81 и 0,82 соответственно).

Объектом исследований служили сорта суданской травы селекции ФГБНУ «АНЦ «Донской» – Александрина, Алиса, Грация, Кудесница.

Сорта Александрина, Алиса и Грация допущены к использованию в производстве с 2007, 2019 и 2020 гг. соответственно, Кудесница проходит государственное сортоиспытание с 2023 г. Сорта относятся к среднеспелой группе созревания, холодоустойчивые, устойчивы к полеганию, поражению пыльной головней и бактериозом, урожайность в сумме за два укоса составляет более 40 т/га.

Закладку опытов проводили в соответствии с Методикой государственной комиссии по сортоиспытанию сельскохозяйственных культур⁵. Посев осуществляли в оптимальные сроки (первая-вторая декада мая) широко-рядным (междурядье 70 см, норма высева 340 тыс. семян/га) и обычным рядовым (междурядье 15 см, 1,6 млн семян/га) способами. Площадь делянки 5 м², повторность 3-кратная, расположение делянок систематическое, площадь опыта 180 м².

Динамику накопления сухого вещества и протеина по этапам роста и развития растений изучали по общепринятым методикам (ГОСТ 31640-2012⁶, ГОСТ 13496.4-2019⁷). В течение

вегетации проводили 5 укосов зеленой массы с делянки с отбором проб на биохимический анализ в фазы «кущение», «начало выметывания», «цветение», «молочно-восковая спелость», «полная спелость».

Статистическую обработку данных проводили методом дисперсионного анализа по Б. А. Доспехову⁸.

Результаты и обсуждение. В период «всходы-кущение» накопление сухого вещества происходит медленными темпами, так как в это время идет активный рост корневой системы. В фазу «кущение» содержание сухого вещества в зеленой массе изученных сортов суданской травы не превышало 15 %. Однако его накопление происходило быстрыми темпами за счет формирования боковых побегов и высокой густоты стояния растений. Так, при рядовом способе посева к началу выметывания прирост данного показателя составил 0,93–5,40 % в абсолютных величинах, или 6,55–42,79 % к первоначальному значению (табл. 1).

К фазе «цветение» содержание сухого вещества у сортов было практически одинаковое – 20,92–21,81 %. Высокий темп накопления сухого вещества после фазы «выметывание» определяется формированием метелок с зерном, доля которых вместе со стеблем в урожае биомассы по мере старения растений увеличивается. К фазе «полная спелость» различия сортов по данному показателю становятся более очевидными. Стандарт Александрина превосходит только сорт Грация с содержанием сухого вещества в зеленой массе 54,78 %. Превышение составило 6,60 % в абсолютных величинах, или 13,7 %. В целом прирост сухого вещества за период «кущение – полная спелость» составил 29,14–40,42 абс.%, или 205,21–281,77 % к первоначальному значению в фазу «кущение». В конце вегетации данный показатель варьировал по сортам в пределах 43,34–54,78 %.

²ГОСТ 23740-2016. Грунты. Методы определения содержания органических веществ. М.: Стандартинформ, 2017. 12 с. URL: https://euro-test.ru/Pub.Lib/Normativ_docs/GOST23740.pdf

³ГОСТ 26205-91. Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Мачигина в модификации ЦИНАО. М.: изд-во стандартов, 1992. 10 с. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/7f6/4294828275.pdf>

⁴Справочник эколого-климатических характеристик. г. Москвы. Под ред. А. А. Исаева. М., 2005. Т. 2. 412 с.

⁵Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. Вып. второй. Зерновые, крупяные, зернобобовые, кукуруза и кормовые культуры. М., 1989. 194 с.

⁶ГОСТ 31640-2012. Корма. Методы определения содержания сухого вещества. М.: Стандартинформ, 2013. 11 с. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293787/4293787414.pdf>

⁷ГОСТ 13496.4 2019. Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Методы определения содержания азота и сырого протеина. М.: Стандартинформ, 2019. 20 с. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293727/4293727957.pdf>

⁸Доспехов Б. А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М.: Альянс, 2014. 351 с.

Таблица 1 – Содержание сухого вещества (%) в зеленой массе сортов суданской травы в течение вегетации при рядовом способе посева (среднее 2021–2023 гг.) /

Table 1 – Changes in dry matter content (%) in green mass of the Sudan grass varieties during the vegetation period with the row sowing method (average for 2021–2023)

<i>Copt / Cultivar</i>	<i>Фаза вегетации / Vegetation phase</i>				
	<i>кущение / tillering</i>	<i>начало выметывания / start of heading</i>	<i>цветение / flowering</i>	<i>молочно-восковая спелость / milky-waxy ripeness</i>	<i>полная спелость / full ripeness</i>
Александрина, ст. / 'Aleksandrina', st	12,62	18,02	21,06	42,08	48,18
Алиса / 'Alisa'	13,13	16,21	20,92	45,73	46,86
Грация / 'Gratsiya'	14,36	16,47	21,81	44,55	54,78
Кудесница / 'Kudesnitsa'	14,20	15,13	21,51	37,8	43,34
Среднее / Average	13,56	16,46	21,33	42,54	48,29
HCP ₀₅ / LSD ₀₅	0,81	1,56	0,42	2,96	3,89

При широкорядном способе посева в фазу «кущение» содержание сухого вещества в зеленой массе сортов было ниже, чем при рядовом посева и варьировало в пределах 10,11–11,52 % (табл. 2).

Таблица 2 – Содержание сухого вещества (%) в зеленой массе сортов суданской травы в течение вегетации при широкорядном способе посева (среднее 2021–2023 гг.) /

Table 1 – Changes in dry matter content in the green mass of Sudanese grass varieties during the vegetation period with a wide-row sowing method (average for 2021–2023)

<i>Copt / Cultivar</i>	<i>Фаза вегетации / Vegetation phase</i>				
	<i>кущение / tillering</i>	<i>начало выметывания / start of heading</i>	<i>цветение / flowering</i>	<i>молочно-восковая спелость / milky-waxy ripeness</i>	<i>полная спелость / full ripeness</i>
Александрина, ст. / 'Aleksandrina', st	10,88	17,23	21,40	35,00	50,38
Алиса / 'Alisa'	10,33	17,41	21,66	35,78	48,72
Грация / 'Gratsiya'	10,11	17,36	25,19	44,48	56,54
Кудесница / 'Kudesnitsa'	11,52	17,13	21,51	35,33	54,34
Среднее / Average	10,71	17,28	22,44	35,15	52,50
HCP ₀₅ / LSD ₀₅	0,57	0,32	0,29	0,80	1,35

Однако нарастание сухого вещества происходило гораздо быстрее, чем при рядовом способе посева. Это объясняется большей площадью питания растений, плодотворно влияющей на формирование мощной вегетативной массы – более высоких растений, толстого стебля, крупных листьев и др. Так, прирост содержания сухого вещества к фазе «начало выметывания» по сортам составил 4,25–7,25 абс.%, или 39,06–71,71 % по отношению к первоначальной величине. К моменту цветения темпы накопления снижаются, и к молочно-восковой спелости, когда происходит налив зерна, содержание сухого вещества у сортов имеет показатели 34,48–44,48 % и при-

рост за период 15–20 дней к данному показателю в фазу «цветение» составляет 36,88–65,19 %. Аналогичная ситуация наблюдается и в период «молочно-восковая–полная спелость».

Наибольшее значение содержания сухого вещества отмечено у сорта Грация (56,54 %), что выше стандарта на 6,06 % в абсолютных величинах или 12,03 %. На рисунке 1 показаны темпы накопления данного показателя по мере старения растений на примере сорта Грация. Пик нарастания содержания сухого вещества (19,29 и 22,74 % в абс. величинах к предыдущим значениям) приходится на период налива зерна (фаза «молочно-восковая спелость») независимо от способа посева.

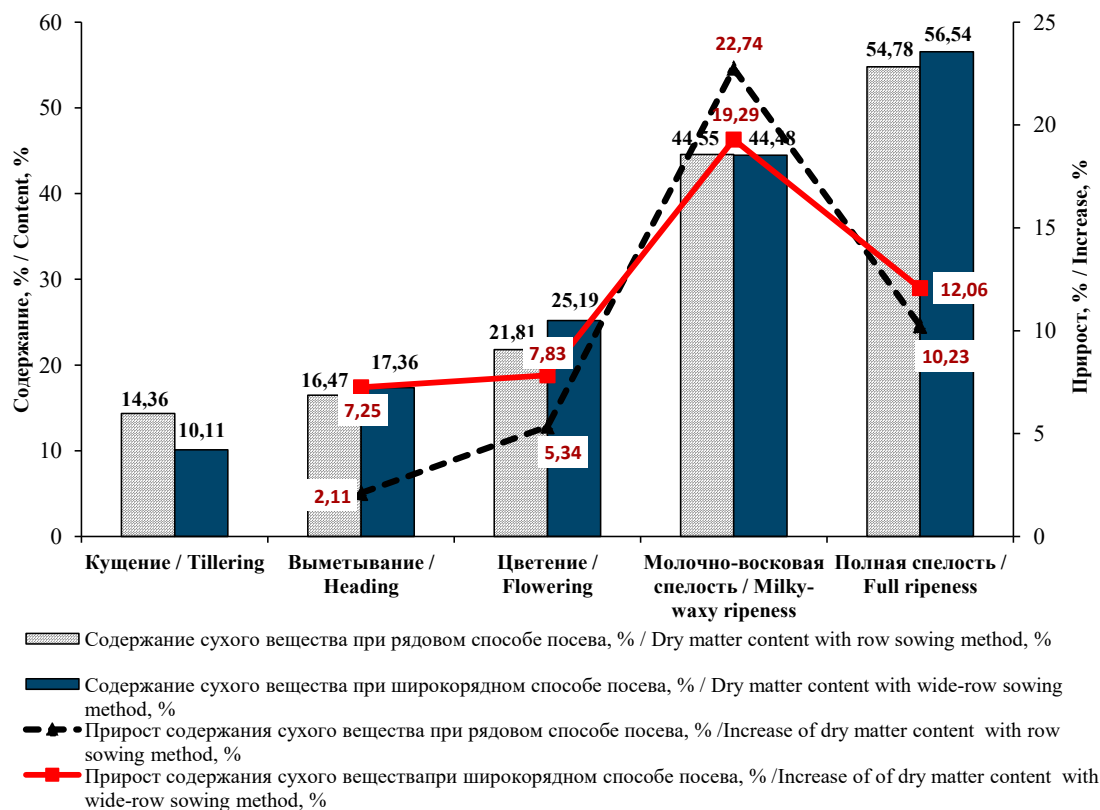


Рис. 1. Динамика накопления сухого вещества в зеленой массе суданской травы в течение вегетации сорта Грация (среднее 2021–2023 гг.) /

Fig. 1. Dynamics of dry matter accumulation in the green mass of Sudanese grass variety 'Gratsiya' (average for 2021–2023)

У сорта Грация величина признака к моменту первого укоса на зеленую массу (фаза «выметывание») составила 16,47 % при рядовом и 17,36 % – при широкорядном посеве, к фазе «полная спелость» – 54,78 и 56,54 % соответственно. То есть, на накопление сухого вещества в зеленой массе способ посева практически влияния не оказывает.

Превышение содержания сухого вещества отмечено при широкорядном способе посева. Так, в среднем по сортам эта величина в фазу «выметывание», когда проводится уборка зеленой массы, при широкорядном способе посева составила 17,28 %, при рядовом – 16,48 %, в фазу «полная спелость» – 52,50 и 48,29 % соответственно.

По содержанию белка наблюдается обратная картина: по мере старения растений количество протеина постепенно снижается. Это объясняется уменьшением в структуре урожая зеленой массы удельного веса листьев, в которых содержится больше белка, чем в других частях растений. Установлено, что доля листьев снижается с 35 % в фазу «выход в трубку» до 20 % – в фазу «молочная спелость» [7]. Поэтому для получения более питатель-

ного корма рекомендуется приступать к уборке зеленой массы суданской травы, начиная с фазы «выход в трубку» и заканчивая в фазу «цветение» [8, 9].

При рядовом способе посева в сухом веществе зеленой массы в фазу «кушение» содержалось 11,39–14,75 % сырого протеина. Считается, что наибольший прирост листьев наблюдается в период «всходы-кушение», в дальнейшем темпы роста снижаются. После фазы «выметывание» новые листья перестают формироваться, а нижние начинают засыхать, протеин из нижней части растений переходит в верхнюю, где происходит формирование зерна. По мере роста строение растений меняется, накапливается больше волокон, увеличивается доля стеблей, поэтому содержание протеина в сухом веществе в течение вегетации уменьшается. Так, если к фазе «выметывание» снижение составило 1,57–2,85 % в абсолютных величинах (10,64–23,36 % относительно первоначального значения в фазе «кушение»), то к фазе «цветение» – 2,90–6,70 абс.% (23,63–45,42 %), к фазе «молочно-восковая спелость» – 5,37–8,70 абс.% (43,77–61,18 %), к фазе «полная спелость» – 5,53–9,15 % (45,07–62,48 %) соответственно (табл. 3).

Таблица 3 – Содержание сырого протеина в сухом веществе зеленой массы сортов суданской травы в течение вегетации при рядовом способе посева, % (среднее 2021–2023 гг.) /

Table 3 – Changes in crude protein percentage in dry matter of the Sudan grass varieties during the vegetation period with the row sowing method, % (average for 2021–2023)

<i>Coptm / Cultivar</i>	<i>Фаза вегетации / Vegetation phase</i>				
	<i>кущение / tillering</i>	<i>начало выметывания / start of heading</i>	<i>цветение / flowering</i>	<i>молочно-восковая спелость / milky-waxy ripeness</i>	<i>полная спелость / full ripeness</i>
Александрина, ст. / 'Aleksandrina', st	11,39	13,78	7,56	5,35	5,17
Алиса / 'Alisa'	14,75	13,18	6,05	6,05	5,60
Грация / 'Gratsiya'	12,27	9,80	9,37	6,90	6,74
Кудесница / 'Kudesnitsa'	12,20	9,35	6,74	6,68	6,33
Среднее / Average	12,65	11,53	7,43	6,25	5,96
HCP ₀₅ / LSD ₀₅	1,01	1,56	1,30	0,60	0,55

К периоду уборки зеленой массы (фаза «начало выметывания») среди новых сортов наибольшим содержанием сырого протеина (на уровне стандарта) отличался сорт Алиса (13,18 %). Однако при задержке уборки наблюдается резкое снижение данного показателя, и к моменту цветения содержание сырого протеина у сорта Алиса составило 6,05 %.

Наименьшие темпы потери сырого протеина отмечены у сорта Грация, в сухом веществе которого к полной спелости содержится 6,74 % протеина.

При ширококормном способе посева содержание сырого протеина в фазу «кущение» было почти в два раза выше, чем при рядовом посеве и составляло 21,33–24,17 % (табл. 4). При ширококормном посеве площадь листовой поверхности растений выше, чем в рядовом. Листья лучше освещены и получают больше солнечной энергии, обеспеченность азотом выше за счет большей площади питания. При загущении посевов содержание протеина снижается [9].

Таблица 4 – Содержание сырого протеина в сухом веществе зеленой массы сортов суданской травы в течение вегетации при ширококормном способе посева, % (среднее 2021–2023 гг.) /

Table 3 – Changes in crude protein percentage in dry matter of the Sudan grass varieties during the vegetation period with a wide-row sowing method, % (average for 2021–2023)

<i>Coptm / Cultivar</i>	<i>Фаза вегетации / Vegetation phase</i>				
	<i>кущение / tillering</i>	<i>начало выметывания / start of heading</i>	<i>цветение / flowering</i>	<i>молочно-восковая спелость / milky-waxy ripeness</i>	<i>полная спелость / full ripeness</i>
Александрина, ст. / 'Aleksandrina', st	21,33	14,59	9,95	9,43	8,61
Алиса / 'Alisa'	22,80	15,43	9,37	8,32	8,01
Грация / 'Gratsiya'	24,17	14,74	10,77	9,47	7,61
Кудесница / 'Kudesnitsa'	22,93	16,55	10,54	9,46	8,45
Среднее / Average	22,81	15,33	10,16	9,17	8,01
HCP ₀₅ / LSD ₀₅	0,96	0,80	0,55	0,56	0,29

К фазе «начало выметывания» величина признака резко снижается на 6,38–9,43 % в абсолютных величинах (27,82–39,02 % к первоначальному значению). В этот период наибольшее содержание сырого протеина, существенно выше стандарта, отмечено у сортов

Алиса (15,43 %) и Кудесница (16,55 %). При задержке со сроками уборки содержание сырого протеина снижается к фазе «цветение» до 9,37–10,77 %, то есть на 11,9–14,7 %. К фазе «полная спелость зерна» значения признака по сортам составляют 7,61–8,61 %, что ниже

первоначальной величины в фазу «кущение» на 12,72–16,56 абс.% (59,63–68,51 %). При рядовом способе посева такие значения признака отмечены в фазу «цветение».

На рисунке 2 показано изменение содержания сырого протеина сорта Кудесница в зависимости от фазы вегетации. От начала

вегетации до фазы «полная спелость зерна» прослеживается превышение данного показателя при широкорядном посеве. Наибольший скачок в сторону снижения признака отмечен в период от начала выметывания до цветения, потом темпы снижения замедляются.

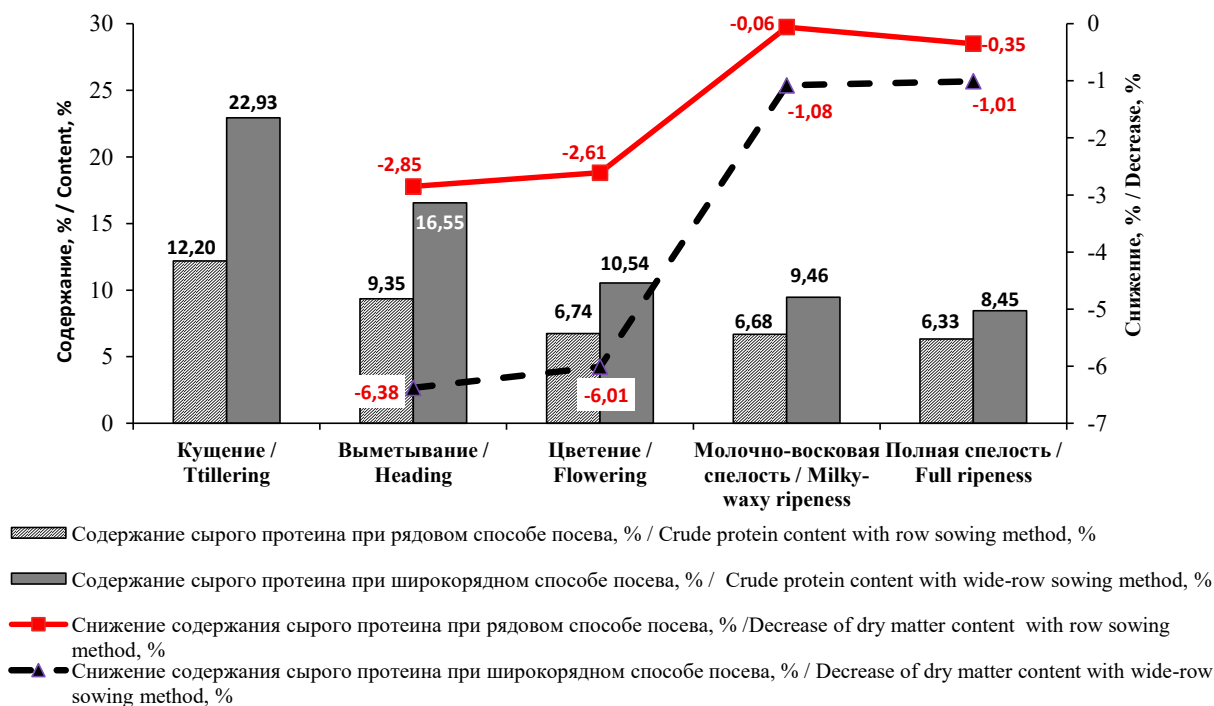


Рис. 2. Содержание сырого протеина в сухом веществе зеленой массы суданской травы в течение вегетации на примере сорта Кудесница (среднее 2021–2023 гг.) /

Fig. 2. Decrease of crude protein percentage in dry matter of green mass of Sudan grass using the example of variety 'Kudesnitsa' (average for 2021–2023)

Полученные данные согласуются с исследованиями ряда ученых. По мере старения растений происходит увеличение углеводов, кремния, лигнина, снижается усвояемость питательных веществ, концентрация протеина, зола, жира, увеличивается – сухого вещества и клетчатки [10, 11].

Выводы. Анализ динамики содержания протеина и сухого вещества в зеленой массе новых сортов суданской травы в условиях недостаточного увлажнения 2021–2023 гг. позволил сделать следующие выводы.

1. К концу вегетации сортов суданской травы прирост содержания сухого вещества зеленой массы при рядовом посеве составил 205,21–281,77 % к значениям этого показателя в фазу «кущение», при широкорядном – 371,64–459,24 % соответственно. При этом в абсолютных величинах содержание сухого вещества при рядовом посеве варьировало в пределах 43,34–54,78 %, 48,72–56,54 % – при широкорядном. Как в фазу «выметывания»,

так и к моменту достижения полной спелости по содержанию сухого вещества отмечено незначительное преимущество широкорядного посева.

2. Наибольшее содержание и высокие темпы роста сухого вещества отмечены у сорта Грация: в фазу «выметывание» 16,47 % при рядовом посеве и 17,36 % – при широкорядном; в фазу «полная спелость» – 54,78 и 56,54 % соответственно.

3. Содержание сырого протеина в сухом веществе зеленой массы при широкорядном посеве в начале вегетации было в два раза выше, чем при сплошном посеве и составило по сортам 21,33–24,17 %. Начиная с фазы «выметывание», величина признака резко снижалась и к полной спелости зерна составила при рядовом посеве 5,17–6,74 % и 8,01–8,61 % – при широкорядном. Таким образом, на протяжении всей вегетации значение признака было выше при широкорядном способе посева.

4. Минимальные темпы потери содержания сырого протеина при рядовом посеве отмечены у сорта Грация, у которого зеленая масса к полной спелости содержала 6,74 % протеина, при широкорядном – у Александрина и Кудесница – 8,61 и 8,45 соответственно.

5. Таким образом, в зоне недостаточного увлажнения для получения качественных

зеленых кормов рекомендуется проводить посев широкорядным способом с уборкой в фазу «выметывание». При задержке с уборкой содержание сырого протеина резко падает. По содержанию сырого протеина следует выделить сорт Кудесница с наибольшим значением в фазу «выметывание» – 16,55 %.

Список литературы

1. Костылев П. И., Аксенов А. В., Краснова Е. В. Оценка продуктивности образцов риса в условиях жесткой полевой засухи. *Зерновое хозяйство России*. 2023;15(4):35–42. DOI: <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2023-87-4-35-42> EDN: IXFVXS
2. Prado de Castro I., Santos H., Figueiredo M., Macêdo A., Lima M., Silva J., Silva A., Ramos B. Nutritive value of hay from sorghum-sudangrass hybrids (*Sorghum sudanense* vs. *Sorghum bicolor*). *Brazilian Journal of Development*. 2020;6(9):64816–64826. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n9-061>
3. Enchev S. Productivity and feed quality of Sudan grass (*Sorghum sudanense* (Piper) Stapf.) and sweet sorghum forms. *Agricultural Science and Technology*. 2021;13:57–62. DOI: <https://doi.org/10.15547/ast.2021.01.011>
4. Бахарева Н. В., Гусев В. В., Халикова М. М., Храмов А. В., Ескова В. С., Мустафина Т. Ш., Дустанов И. В. Новые сорта и гибриды травянистого сорго и их хозяйственно-полезные признаки. *Успехи современного естествознания*. 2023;(1):7–12. DOI: <https://doi.org/10.17513/use.37977> EDN: VCDDCG
5. Bazitov R., Enchev S. Productivity and chemical composition of green biomass from Sudan grass, grown as a second crop, with optimal and insufficient water supply. *Agricultural Sciences*. 2021;13(31):81–86. DOI: <https://doi.org/10.22620/agrisci.2021.31.012>
6. Филатов В. И., Филатова Е. В. Энергетическая и протеиновая ценность суданской травы в зависимости от фазы вегетации. *Вестник КрасГАУ*. 2014;(1):129–131. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21268177> EDN: RXKSAB
7. Алабушев А. В., Ковтунова Н. А., Ковтунов В. В., Ермолина Г. М. Кормовая ценность суданской травы в зависимости от срока уборки. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2019;20(4):343–350. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2019.20.4.343-350> EDN: ZKCVBZ
8. Hernández A. P., Carrillo A. R. Q., Estrada J. A. S. E., González M. T. R., Velázquez S. G., Jiménez L. M. Phenology, biomass and growth analysis in forage sorghum cultivars for highplateaus. *Agronomía Costarricense*. 2018;42(2):107–117. URL: <https://www.scielo.sa.cr/pdf/ac/v42n2/0377-9424-ac-42-02-107.pdf>
9. Мардваев Н. Б., Шапсович С. Н. Суданская трава в Бурятии – наиболее экстремальной зоне ее возделывания в России. *Norwegian Journal of Development of the International Science*. 2019;26-2:10–14. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36920061> EDN: YWITUT
10. Копылов В. Л., Шестак Н. М., Радовня В. А., Карелин В. В. Кормовая продуктивность и качество сорго сахарного в условиях белорусского Полесья. *Ветеринарный журнал Беларуси*. 2021;(2(15)):89–93. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47687827> EDN: ZPLLML
11. Шкодина Е. П. Биологические основы выращивания сорго на Северо-Западе Нечерноземной зоны. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2021;22(4):531–541. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2021.22.4.531-541> EDN: ZQMMYM

References

1. Kostylev P. I., Aksenov A. V., Krasnova E. V. Otsenka produk-tivnosti obraztsov risa v usloviyakh zhestkoy polevoy zasukhi. *Zernovoe khozyaystvo Rossii* = Grain Economy of Russia. 2023;15(4):35–42. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2023-87-4-35-42>
2. Prado de Castro I., Santos H., Figueiredo M., Macêdo A., Lima M., Silva J., Silva A., Ramos B. Nutritive value of hay from sorghum-sudangrass hybrids (*Sorghum sudanense* vs. *Sorghum bicolor*). *Brazilian Journal of Development*. 2020;6(9):64816–64826. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n9-061>
3. Enchev S. Productivity and feed quality of Sudan grass (*Sorghum sudanense* (Piper) Stapf.) and sweet sorghum forms. *Agricultural Science and Technology*. 2021;13:57–62. DOI: <https://doi.org/10.15547/ast.2021.01.011>
4. Bakhareva N. V., Gusev V. V., Khalikova M. M., Khramov A. V., Eskova V. S., Mustafina T. Sh., Dustanov I. V. New varieties and hybrids of herbaceous sorghum and their economically useful signs. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*. 2023;(1):7–12. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17513/use.37977>
5. Bazitov R., Enchev S. Productivity and chemical composition of green biomass from Sudan grass, grown as a second crop, with optimal and insufficient water supply. *Agricultural Sciences*. 2021;13(31):81–86. DOI: <https://doi.org/10.22620/agrisci.2021.31.012>

6. Filatov V. I., Filatova E. V. Energy and protein value of sudan grass depending on the vegetation phase. *Vestnik KrasGAU* = The Bulletin of KrasGAU. 2014;(1):129–131. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21268177>
7. Alabushev A. V., Kovtunova N. A., Kovtunov V. V., Ermolina G. M. Fodder value of Sudan grass depending on the harvesting time. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2019;20(4):343–350. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2019.20.4.343-350>
8. Hernández A. P., Carrillo A. R. Q., Estrada J. A. S. E., González M. T. R., Velázquez S. G., Jiménez L. M. Phenology, biomass and growth analysis in forage sorghum cultivars for highplateaus. *Agronomía Costarricense*. 2018;42(2):107–117. URL: <https://www.scielo.sa.cr/pdf/ac/v42n2/0377-9424-ac-42-02-107.pdf>
9. Mardvaev N. B., Shapsovich S. N. Sudan grass in Buryatia – the most extreme zone of its cultivation in Russia. *Norwegian Journal of Development of the International Science*. 2019;26-2:10–14. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36920061>
10. Kopylovich V. L., Shestak N. M., Radovnya V. A., Karelin V. V. Fodder yield and quality of sweet sorghum in the conditions of the Belarusian Polesie. *Veterinarnyy zhurnal Belarusi*. 2021;(2(15)):89–93. (In Belarus). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47687827>
11. Shkodina E. P. Biological basis of sorghum cultivation in the North-West of the Non-Chernozem zone. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2021;22(4):531–541. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2021.22.4.531-541>

Сведения об авторах

✉ **Ковтунова Наталья Александровна**, кандидат с.-х. наук, ведущий научный сотрудник, ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской», Научный городок 3, г. Зерноград, Ростовская область, Российская Федерация, 347740, e-mail: yniizk30@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0409-5855>, e-mail: n-beseda@mail.ru

Ковтунов Владимир Викторович, кандидат с.-х. наук, ведущий научный сотрудник, ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской», Научный городок 3, г. Зерноград, Ростовская область, Российская Федерация, 347740, e-mail: yniizk30@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7510-7705>

Романюкин Александр Егорович, кандидат с.-х. наук, младший научный сотрудник, ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской», Научный городок 3, г. Зерноград, Ростовская область, Ростовская область, Российская Федерация, 347740, e-mail: yniizk30@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4349-8489>

Шишова Елена Александровна, кандидат с.-х. наук, младший научный сотрудник, ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской», Научный городок 3, г. Зерноград, Ростовская область, Российская Федерация, 347740, e-mail: yniizk30@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7406-6622>

Кравченко Нина Станиславовна, кандидат биол. наук, ведущий научный сотрудник, ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской», Научный городок 3, г. Зерноград, Ростовская область, Российская Федерация, 347740, e-mail: yniizk30@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3388-1548>

Information about the authors

✉ **Natalia A. Kovtunova** PhD in Agricultural Science, leading researcher, Agricultural Research Center «Donskoy», Nauchny Gorodok, 3, Zernograd, Rostov region, Russian Federation, e-mail: yniizk30@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0409-5855>, e-mail: n-beseda@mail.ru

Vladimir V. Kovtunov, PhD in Agricultural Science, leading researcher, Agricultural Research Center «Donskoy», Nauchny Gorodok, 3, Zernograd, Rostov region, Russian Federation, e-mail: yniizk30@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7510-7705>

Aleksandr E. Romanyukin, PhD in Agricultural Science, junior researcher, Agricultural Research Center «Donskoy», Nauchny Gorodok, 3, Zernograd, Rostov region, Russian Federation, e-mail: yniizk30@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4349-8489>

Elena A. Shishova, PhD in Agricultural Science, junior researcher, Agricultural Research Center «Donskoy», Nauchny Gorodok, 3, Zernograd, Rostov region, Russian Federation, e-mail: yniizk30@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7406-6622>

Nina S. Kravchenko, PhD in Biological Science, leading researcher, Agricultural Research Center «Donskoy», Nauchny Gorodok, 3, Zernograd, Rostov region, Russian Federation, e-mail: yniizk30@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3388-1548>

✉ – Для контактов / Corresponding author

<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.3.453-464>

УДК 636.082.12:636.32/.38.082.13

**Использование таргетного секвенирования для генотипирования овец породы джалгинский меринос**

© 2024. А. Ю. Криворучко, А. А. Каниболоцкая✉, Л. Н. Скорых, О. Н. Криворучко

ФГБНУ «Северо-Кавказский Федеральный научный аграрный центр», г. Михайловск, Ставропольский край, Российская Федерация

Однонуклеотидные полиморфизмы (SNP), как наиболее важный тип генетической изменчивости, широко используются для подтверждения происхождения сельскохозяйственных животных и играют важную роль в селекции и разведении. Наиболее важным преимуществом при идентификации аллелей SNP является точность, что позволяет с уверенностью определять генотип. AgriSeq (ThermoFisher (США)) – это технология секвенирования, которая может быть использована для целенаправленной амплификации и повторного секвенирования тысяч мишеней SNP в рамках одной реакции. Этот метод специально адаптирован для животноводства и уже содержит готовые панели для некоторых видов домашних животных, однако, для использования их у овец необходимо провести предварительный отбор локусов, пригодных для генотипирования секвенированием. Цель работы: изучить эффективность выявления и распространенности локусов из предложенного набора SNP при обследовании новых поколений овец породы джалгинский меринос. Материалом для исследования послужили данные таргетного секвенирования геномов овец российских пород по сформированному набору локусов с целью выявления однонуклеотидных полиморфизмов. Предложенная панель локусов, модифицированная после валидации на втором поколении животных, содержит 352 замены, пригодных для генотипирования секвенированием и 413 полиморфизмов, ассоциированных с мясной продуктивностью животных. Оценка частоты встречаемости полиморфизмов, имеющих достоверную связь с показателями мясной продуктивности, между группами 2021 и 2022 года рождения показала, что большинство замен почти не различаются по частоте встречаемости между поколениями. Полученные в результате исследований показатели частоты встречаемости замен в группе выбранных животных позволяют сделать заключение, что выбранные нами полиморфизмы находятся в локусах, не подверженных существенным перестройкам в течение нескольких поколений, и могут быть информативны в течение достаточно длительного времени.

Ключевые слова: панель локусов, секвенирование, AgriSeq, SNP, генотип, частота встречаемости, овцы**Благодарности:** работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Северо-Кавказский Федеральный научный аграрный центр» (тема № FNMU-2022-0009).

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.**Для цитирования:** Криворучко А. Ю., Каниболоцкая А. А., Скорых Л. Н., Криворучко О. Н. Использование таргетного секвенирования для генотипирования овец породы джалгинский меринос. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2024;25(3):453–464. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.3.453-464>

Поступила: 12.04.2024

Принята к публикации: 31.05.2024

Опубликована онлайн: 26.06.2024

The use of targeted sequencing for genotyping sheep of the Dzhalginsky Merino breed

© 2024. Alexander Yu. Krivoruchko, Anastasia A. Kanibolotskaya✉, Larisa N. Skorykh, Olga N. Krivoruchko

North Caucasus Federal Agricultural Research Centre, Mikhailovsk, Stavropol Territory, Russian Federation

Single Nucleotide polymorphisms (SNP) as the most important type of genetic variability are widely used to confirm the origin of farm animals and they play an important role in breeding and raising. Their most important advantage in the identification of SNP alleles is accuracy which makes it possible to determine the genotype precisely. AgriSeq (ThermoFisher (USA)) is a sequencing technology that can be used to purposefully amplify and re-sequence thousands of SNP targets in a single reaction. This method is specially adapted for animal husbandry and already contains ready-made panels for some types of domestic animals. However, in order to use them in sheep, it is necessary to pre-select loci suitable for genotyping by sequencing. The purpose of the work is to study the effectiveness of identifying and prevalence of loci from the proposed set of SNPs in the examination of new generations of sheep of the Dzhalginsky Merino breed. The material for the study was data

from targeted sequencing of the genomes of Russian sheep breeds according to the formed set of loci in order to identify single-nucleotide polymorphisms. The proposed panel of loci, modified after validation on the second generation of animals, contains 352 substitutions suitable for genotyping by sequencing and 413 polymorphisms associated with meat productivity of animals. An assessment of the frequency of polymorphisms with a reliable relationship with meat productivity indicators between the groups born in 2021 and 2022 has shown that most substitutions almost do not differ in frequency between generations. The indicators of the frequency of occurrence of substitutions in the group of selected animals obtained as a result of research indicate that selected polymorphisms are located in loci that are not subjected to significant rearrangements for several generations and can be informative for quite a long time.

Keywords: locus panel, sequencing, AgriSeq, SNP, genotype, frequency of occurrence, sheep

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 North Caucasus Federal Agricultural Research Centre (theme No. FNMU-2022-0009).

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

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

For citations: Krivoruchko A. Yu., Kanibolotskaya A. A., Skorykh L. N., Krivoruchko O. N. The use of targeted sequencing for genotyping sheep of the Dzhalginsky Merino breed. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2024;25(3):453–464. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.3.453-464>

Received: 12.04.2024

Accepted for publication: 31.05.2024

Published online: 26.06.2024

Животноводство на современном уровне развития становится все более зависимым от передовых научных разработок в области генетики и селекции. Это необходимо для поддержания племенной ценности существующих пород и выведения новых с высокими показателями продуктивности. Использование генетических технологий позволяет сделать более точным учет движения животных в хозяйствах, существенно ускорить процесс селекции и контролировать наличие в популяции только животных с желательным генотипом. За счет применения методов геномики только за последние годы удалось добиться серьезных достижений в селекционной работе по улучшению продуктивных качеств крупного рогатого скота [1, 2], свиней [3], овец [4] и ряда других сельскохозяйственных животных.

Изучение генома животных в настоящее время чаще всего используют для подтверждения достоверности происхождения путем сравнения генотипов родительских особей и потомков. Несмотря на совершенствование методов индивидуальной маркировки животных бирками, использование радиочастотных меток и широкое применение искусственного осеменения в племенных хозяйствах, окончательным методом экспертизы родственных отношений отдельных особей признается только генотипирование. Наиболее широко применяется генотипирование по микросателлитным локусам, обладающих достаточным полиморфизмом внутри породы, но очень редко изменяющихся при передаче наследственной информации. Метод хорошо отработан, достаточно дешевый при массовом использовании,

но имеет свои ограничения, связанные с небольшим количеством одновременно оцениваемых локусов [5].

Более точным и применимым не только для подтверждения достоверности происхождения, но и для ряда других задач генотипирования сельскохозяйственных животных является метод выявления однонуклеотидных полиморфизмов (SNP). Они широко представлены в геноме и могут быть структурной основой изменения активности генов [6]. Ранее для применения на большом количестве животных с сохранением приемлемой стоимости анализа использовали технологию ДНК-биочипов [7]. У этой технологии есть свои недостатки, связанные с необходимостью конструирования ДНК-биочипа и сложностью внесения изменений в его структуру при адаптации под конкретную породу животных. Этот метод эффективно применялся в геномной селекции и позволил существенно повысить продуктивность крупного рогатого скота [8], овец [9] и свиней [3].

Широкое применение методов генотипирования по отдельным однонуклеотидным полиморфизмам как с целью подтверждения достоверности происхождения, так и для выявления положительных генотипов по маркерам продуктивных признаков стало возможным с использованием высокопроизводительного секвенирования нового поколения (NGS) [10, 11]. Удобство применения в массовом масштабе связано с тем, что сам принцип этого метода позволяет одновременно на одном секвенаторе выявлять тысячи полиморфизмов в сотнях образцов ДНК от разных животных

[12, 13]. Каждый образец ДНК помечен собственным баркодом и изучается изолированно от других последовательностей нуклеотидов, но все исследования выполняются на одном чипе секвенатора за один запуск прибора. Это позволяет резко снизить стоимость генотипирования каждого отдельного животного, но выполнить исследование с необходимым числом прочтений каждого нуклеотида [14].

Для более удобного использования методов генотипирования секвенированием в практическом животноводстве уже разработан ряд геномных платформ и программное обеспечение для автоматизации пробоподготовки и учета результатов после получения данных по прочтениям геномных библиотек. Особого внимания среди подобных информационных разработок заслуживает технология AgriSeq, разработанная компанией ThermoFisher (США). В составе технологии как программное обеспечение, позволяющее в удобном интерактивном режиме создавать дизайн панелей для генотипирования секвенированием, так и весь цикл синтеза реагентов для подготовки библиотек ДНК. Важно отметить, что она специально адаптирована для животноводства и содержит готовые панели для крупного рогатого скота и свиней [14]. Однако для использования ее у овец необходимо было провести предварительный отбор локусов, пригодных для генотипирования секвенированием. При этом требуется такой набор локусов, который позволил бы не только оценить достоверность происхождения животных, но и был бы полезен для использования при селекции с целью повышения мясной продуктивности конкретной породы. Ранее мы разработали панель локусов для генотипирования секвенированием овец породы джалгинский меринос на основе данных, полученных с помощью ДНК-биочипов Illumina и проведенного полногеномного поиска ассоциаций. В результате был получен набор из 881 локуса, включающий как наиболее распространенные варианты 468 полиморфизмов для оценки достоверности происхождения, так и 413 SNP, достоверно связанные с параметрами мясной продуктивности [15]. Дальнейшим этапом исследований по использованию методов генотипирования секвенированием в овцеводстве является изучение эффективности выявления и распространенности локусов из предложенного набора при

обследовании новых поколений овец породы джалгинский меринос, что и стало целью нашего исследования.

Цель исследований –изучить эффективность выявления и распространенности локусов из предложенного набора SNP при обследовании новых поколений овец породы джалгинский меринос.

Научная новизна – впервые разработана панель локусов для генотипирования секвенированием овец породы джалгинский меринос.

Материал и методы. Исследования проводили на базе лабораторий ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», Всероссийского научно-исследовательского института овцеводства и козоводства (ВНИИОК) – филиала ФГБНУ «Северо-Кавказский Федеральный научный аграрный центр» и ФГБОУ ВО «Ставропольский государственный аграрный университет». Материалом для исследования послужили данные таргетного секвенирования геномов овец российских пород по сформированному набору локусов с целью выявления однонуклеотидных полиморфизмов.

Объектом исследования на первом этапе генотипирования секвенированием являлись бараны 2021 года рождения в возрасте 12 месяцев (отбор образцов ДНК проводили в 2022 г.) породы джалгинский меринос. Всего было генотипировано 55 баранов. Выбранные животные принадлежали не менее чем к трем неродственным селекционным линиям, внутри линий степень родства не превышала 50 % по отцу. Животные содержались в одинаковых оптимальных условиях в племенных хозяйствах Ставропольского края. Все животные были клинически здоровы и получали полноценный смешанный рацион.

Объектом исследования второго этапа генотипирования секвенированием по модифицированному набору локусов служили годовалые бараны породы джалгинский меринос 2022 года рождения (отбор образцов ДНК выполнен в 2023 г.). Количество образцов составило 55 единиц. Критерии отбора были те же, что и на предыдущем этапе исследования.

Генотипирование секвенированием выполняли в два этапа. На первом этапе генотипировали животных 2021 года рождения, был проведен анализ частоты встречаемости SNP в изучаемых локусах генома и сделаны выводы о дальнейшем использовании отдельных полиморфизмов для генотипирования секвениро-

ванием в рамках предложенной панели. Сравнение частоты встречаемости для оценки стабильности выявления отдельных SNP в целях генотипирования животных проводили с ранее полученными данными путем генотипирования на чипах Ovine Infinium HD BeadChip 600K (Illumina Inc. CA, США). Для дальнейшего исследования на панели локусов были исключены замены, показавшие снижение частоты встречаемости хотя бы одного из генотипов – дикого гомозиготного, гетерозиготного или мутантного гомозиготного. Доработанная панель локусов использовалась на втором этапе эксперимента для генотипирования животных 2022 года рождения. Для выявленных полиморфизмов в образцах ДНК баранов следующего поколения также провели оценку частоты встречаемости генотипов и сделали окончательный вывод о возможности их использования для дальнейшей практической работы в области молекулярно-генетической экспертизы.

Подготовка образцов ДНК и генотипирование секвенированием нового поколения. Геномную ДНК выделяли из образцов цельной крови, взятой в асептических условиях из яремной вены, с помощью набора Pure Link Genomic DNA MiniKit (Invitrogen Life Technologies, США) в соответствии с протоколом производителя. Количественный показатель содержания ДНК в выделенной пробе определяли с использованием NanoDrop OneC (ThermoFisher, США). Подготовка библиотек ДНК проводили с использованием праймеров и реагентов, подобранных на основании нашей заявки для кастомизации панели локусов в среде AgriSeq, в соответствии с рекомендациями производителя (Thermo Fisher Scientific, США). Генотипирование секвенированием выполняли с использованием высокопроизводительного секвенатора Ion GeneStudio S5 (Thermo Fisher Scientific, США) в соответствии с протоколом производителя. Первичную обработку результатов генотипирования проводили с помощью программного обеспечения Torrent Suite™ и Ion Reporter™ (Thermo Fisher Scientific, США).

Контроль качества генотипирования проводили с использованием программного обеспечения Torrent Suite™ и PLINK V.1.07. Длина 97 % прямых и обратных ридов находилась в пределах 150-152 п. н. Для 64 % прямых и 58 % обратных ридов было зарегистрировано не менее чем 36-кратное прочтение. Коли-

чество прочтений с кратностью меньше 30 составило около 2 %. Содержание GC в среднем составило 44,6 % при диапазоне для большинства ридов в пределах от 18 до 75 %. В дальнейшую обработку данных были включены образцы с показателем количества выявленных однонуклеотидных полиморфизмов больше 0,95 (Call Rate). Из анализа исключили однонуклеотидные полиморфизмы с частотой минорных аллелей (MAF – Minor Allele Frequency) меньше 0.01, частотой потерянных генотипов (missing genotype) больше 0.1. В качестве порогового значения по критерию Харди-Вайнберга (Hardy–Weinberg equilibrium) использовали значение $p = 0.00001$.

Генетический и статистический анализы. Анализ частоты встречаемости SNP по результатам генотипирования секвенирование проводили с использованием электронных таблиц Excel 2021 (Microsoft, США). Отдельно изучались частоты встречаемости полиморфизмов, используемых для подтверждения достоверности происхождения и замен, связанных с продуктивными качествами животных в каждой из исследуемых пород. Визуализацию и построение графиков проводили с применением пакета статистической обработки в Excel 2021 (Microsoft, США). Анализируемые полиморфизмы были представлены биаллельными SNP, аллелям присвоены обозначения A и B, в соответствии с проведенными нами первичным анализом и картированием на геном по наименованиям на чипе Ovine Infinium HD BeadChip 600K (Illumina Inc. CA, США). Для картирования и номенклатурного наименования SNP использовали сборку генома Ovis_Aries_3.1.

Результаты и их обсуждение. Оценку результатов генотипирования секвенированием у животных 2021 года рождения проводили по набору локусов, соответствующему породе джалгинский меринос. В набор локусов входили 413 полиморфизмов, влияющих на продуктивные качества джалгинских мериносов и 468 замен, применимых для подтверждения достоверности происхождения у этой породы.

Результаты генотипирования секвенированием по локусам, используемым для подтверждения достоверности происхождения, показали, что средняя частота встречаемости диких гомозигот составил около 0,3, что является оптимальным показателем для этих целей генотипирования (табл. 1).

Таблица 1 – Параметры генотипируемых для подтверждения достоверности происхождения SNP у баранов породы джалгинский меринос 2021 года рождения /
Table 1 – Parameters of genotyped SNP to confirm the authenticity of the origin in rams of the Dzhalginsky Merino breed born in 2021

Показатель / Index	Среднее / Average	Ошибка среднего / The error of the average	Min	Max
Частота встречаемости / Frequency of occurrence:				
диких гомозигот / wild homozygotes	0,299	0,027	0,230	0,370
гетерозигот / heterozygotes	0,402	0,022	0,320	0,480
мутантных гомозигот / mutant homozygotes	0,307	0,031	0,154	0,444
Частота дикого аллеля / The frequency of the wild allele	0,520	0,060	0,390	0,610
Частота мутантного аллеля / The frequency of the mutant allele	0,480	0,090	0,230	0,670

Изучение распределения диких гомозиготных вариантов полиморфизмов по количеству в зависимости от частоты встречаемости показало, что наибольшее число полиморфизмов имели частоту около 0,230 и 0,323 (рис. 1). Наименьшее количество замен имели частоту встречаемости около 0,370. Оптимальной

мы считаем и выявленную среднюю частоту встречаемости у мутантных гомозиготных вариантов. Однако разброс значений от 0,154 до 0,444 (табл. 1) указывает на большое количество образцов, у которых мутантный гомозиготный генотип встречается или слишком редко, или наоборот – слишком часто.

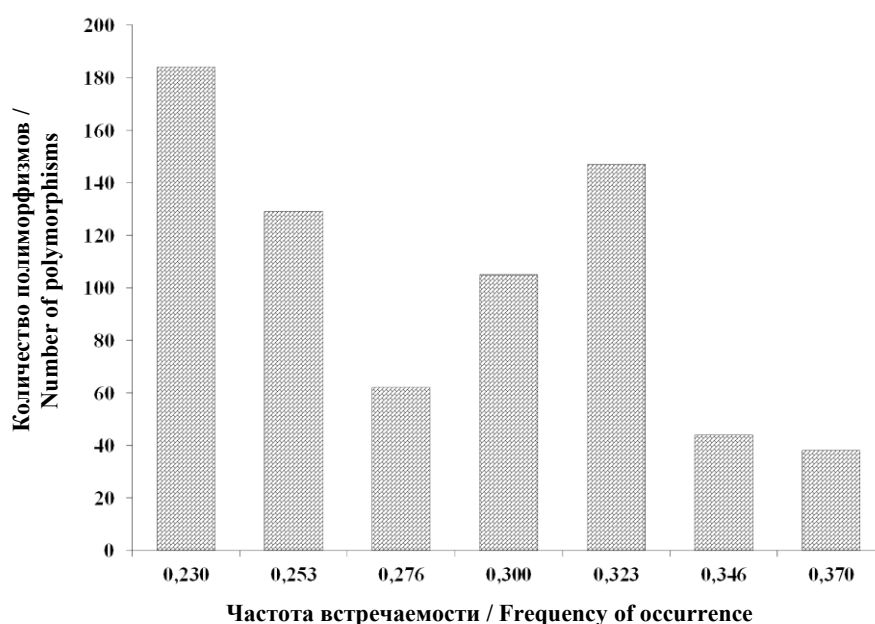


Рис. 1. Количество SNP с разной частотой встречаемости у баранов породы джалгинский меринос. Дикие гомозиготные генотипы /

Fig. 1. The number of SNPs with different frequency of occurrence in rams of the Dzhalginsky Merino breed. Wild homozygous genotypes

Это подтверждает и распределение замен по количеству в зависимости от частоты (рис. 2). Чаще всего среди мутантных гомозиготных генотипов встречались полиморфизмы с частотой около 0,202 и 0,444, меньше всего замен имело частоту около 0,396.

Средняя частота встречаемости гетерозиготных вариантов исследуемых SNP была

достаточно высокой, при этом, даже минимальные показатели были несколько завышены относительно оптимального показателя 0,3 (табл. 1). Наиболее часто выявлялись гетерозиготные генотипы по изучаемым полиморфизмам с частотами 0,400 и 0,426, меньше всего замен обнаруживалось в области частоты встречаемости 0,372 и 0,464 (рис. 3).

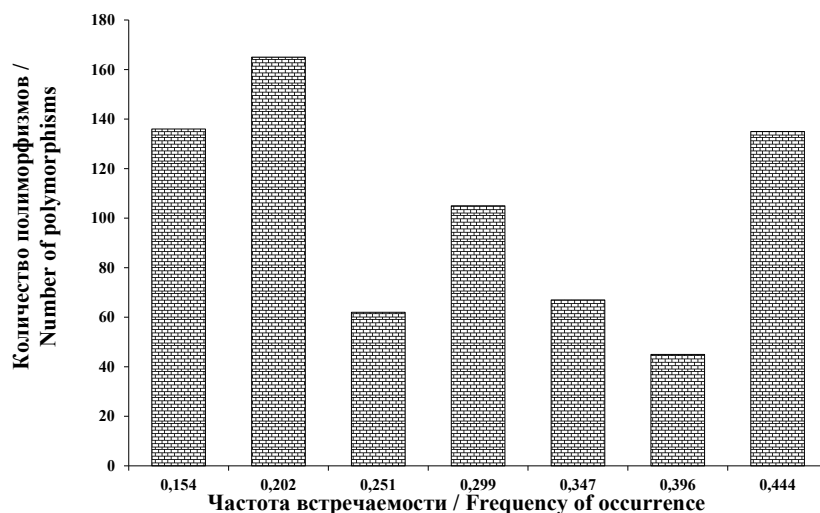


Рис. 2. Количество SNP с разной частотой встречаемости у баранов породы джалгинский меринос. Мутантные гомозиготные генотипы /

Fig. 2. The number of SNPs with different frequency of occurrence in rams of the Dzhalginsky Merino breed. Mutant homozygous genotypes

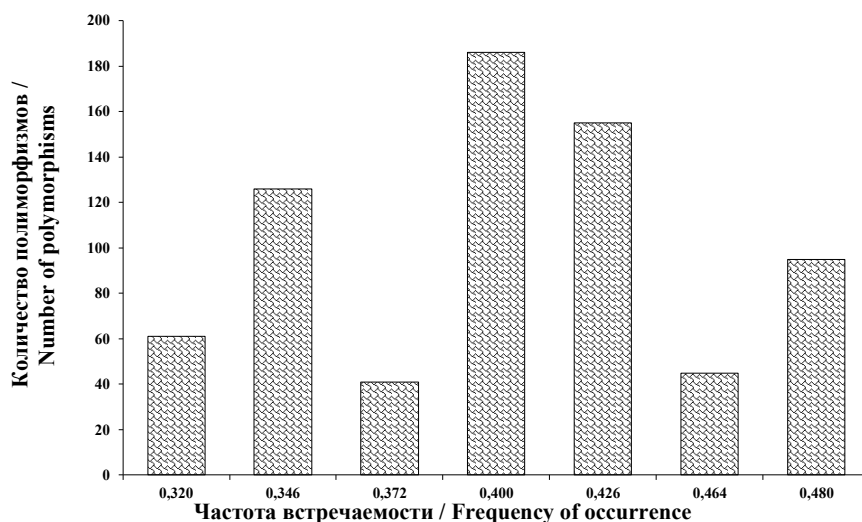


Рис. 3. Количество SNP с разной частотой встречаемости у баранов породы джалгинский меринос. Гетерозиготные генотипы

Fig. 3. The number of SNPs with different frequency of occurrence in rams of the Dzhalginsky Merino breed. Heterozygous genotypes

Средние показатели частоты встречаемости дикого и мутантного аллелей в исследуемой популяции были близкими по значению, что указывает на удовлетворительное для генотипирования по выбранным локусам распределение аллелей у животных по вариантам изучаемых SNP (табл. 1).

Проведение генотипирования секвенированием по локусам мясной продуктивности у баранов породы джалгинский меринос продемонстрировало, что для диких гомозиготных вариантов изучаемых полиморфизмов средняя частота встречаемости была близка к оптимальному показателю 0,3 (табл. 2).

Однако разброс частоты встречаемости был очень высоким – от 0,101 до 0,493. Наибольшее число замен имели частоту встречаемости около 0,232, меньше всего полиморфизмов было по краям диапазона – на частотах около 0,101 и 0,493 (рис. 4).

Гетерозиготные варианты исследуемых полиморфизмов имели достаточно высокую частоту встречаемости – около 0,4. Разброс частоты в этой группе генотипов составил от 0,022 до 0,762. Наибольшее количество замен имели частоту встречаемости с пиками около 0,240, 0,360 и 0,419 (рис. 5).

Таблица 2 – Параметры используемых для оценки мясной продуктивности SNP при генотипировании баранов породы джалгинский меринос 2021 года рождения /
Table 2 – Parameters used to assess the meat productivity of SNP in the genotyping of sheep of the Dzhalginsky Merino breed born in 2021

Показатель / Index	Среднее / Average	Ошибка среднего / The error of the average	Min	Max
Частота встречаемости / Frequency of occurrence:				
диких гомозигот / wild homozygotes	0,296	0,014	0,101	0,493
гетерозигот / heterozygotes	0,311	0,018	0,121	0,479
мутантных гомозигот / mutant homozygotes	0,406	0,019	0,022	0,762
Частота дикого аллеля / The frequency of the wild allele	0,430	0,040	0,180	0,740
Частота мутантного аллеля / The frequency of the mutant allele	0,570	0,060	0,260	0,820

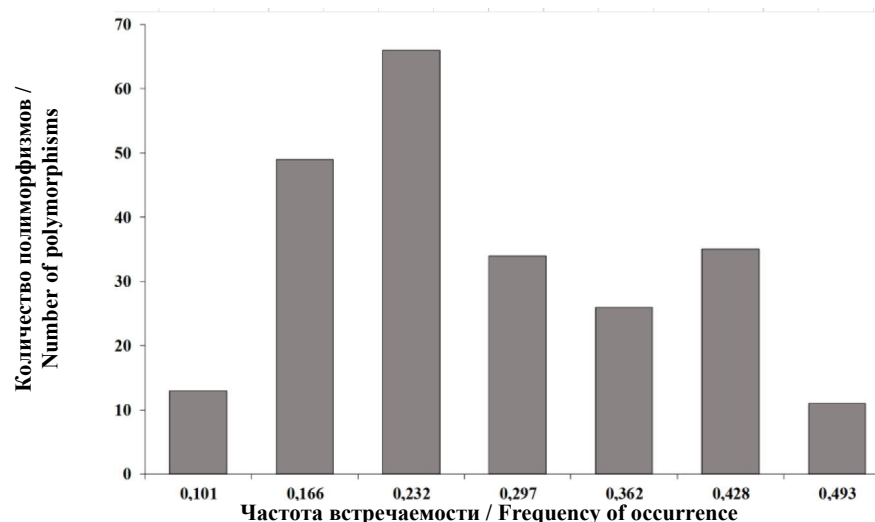


Рис. 4. Количество связанных с мясной продуктивностью SNP с разной частотой встречаемости у баранов породы джалгинский меринос. Дикие гомозиготные генотипы /

Fig. 4. The number of SNPs associated with meat productivity with different frequency of occurrence in rams of the Dzhalginsky merino breed. Wild homozygous genotypes

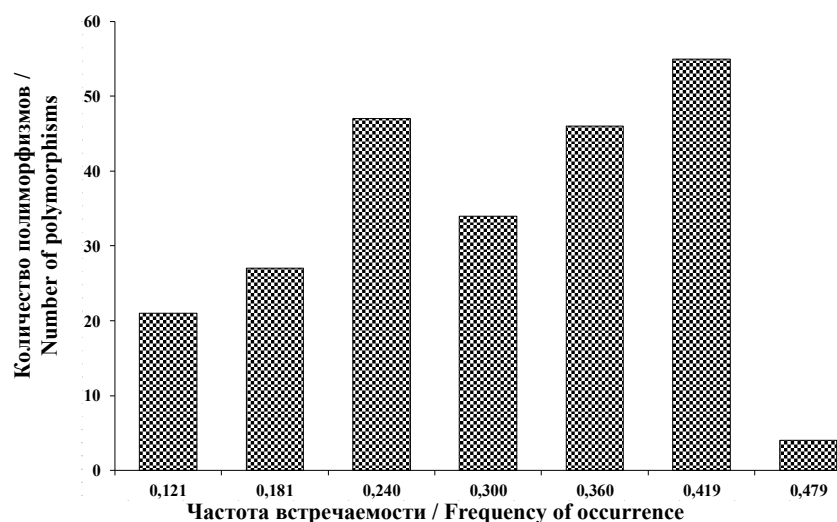


Рис. 5. Количество связанных с мясной продуктивностью SNP с разной частотой встречаемости у баранов породы Джалгинский меринос. Гетерозиготные генотипы /

Fig. 5. The number of SNPs associated with meat productivity with different frequency of occurrence in rams of the Dzhalginsky Merino breed. Heterozygous genotypes

Мутантные гомозиготные генотипы у исследуемых животных имели среднюю частоту встречаемости, больше чем на 30 % превышающую оптимальный интервал. Также отмечена очень высокая дисперсия частоты

встречаемости отдельных полиморфизмов – от 0,022 до 0,762. При этом максимальное число замен имели частоту около 0,510, минимальное количество – 0,762 (рис. 6).

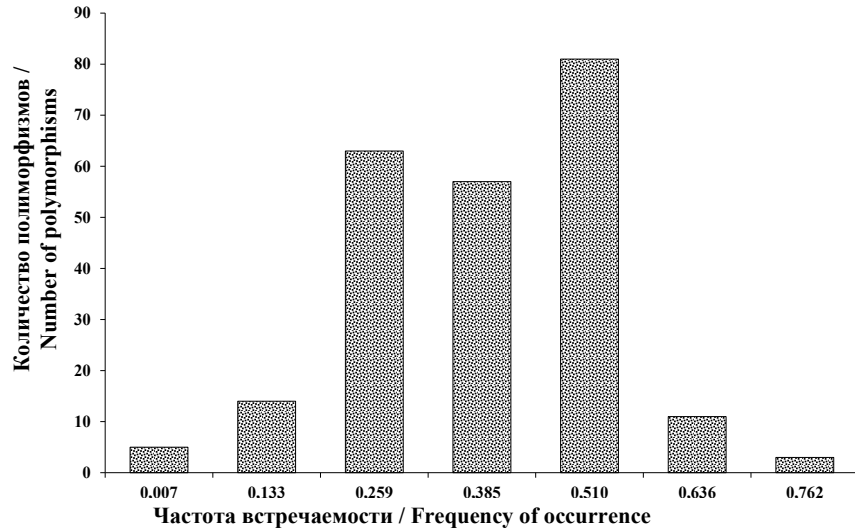


Рис. 6. Количество связанных с мясной продуктивностью SNP с разной частотой встречаемости у баранов породы джалгинский меринос. Мутантные гомозиготные генотипы /

Fig. 6. The number of SNPs associated with meat productivity with different frequency of occurrence in rams of the Dzhalginsky merino breed. Mutant homozygous genotypes

Сравнение частоты встречаемости полиморфизмов при генотипировании секвенированием с данными, полученными нами ранее при генотипировании на ДНК-биочипах, показало, что имеется изменение этого показателя

для всех вариантов генотипов. Так, частота встречаемости диких гомозиготных генотипов по каждой из замен изменилась в среднем на 12% (табл. 3).

Таблица 3 – Изменение частоты встречаемости SNP у баранов породы джалгинский меринос 2021 года рождения по сравнению с данными генотипирования на ДНК-биочипах /

Table 3 – Change in the frequency of occurrence of SNP in rams of the Dzhalginsky Merino breed born in 2021 compared with genotyping data on DNA biochips

Показатель / Index	Среднее / Average	Ошибка среднего / The error of the average	Min	Max
Изменение частоты встречаемости, % / Changing the frequency of occurrence, %:				
диких гомозигот / wild homozygotes	12,126	0,75	0,084	29,246
гетерозигот / heterozygotes	10,377	1,15	0,005	25,266
мутантных гомозигот / mutant homozygotes	17,208	1,92	0,013	55,044

При этом минимально зарегистрированное изменение составило 0,084 % (что, практически соответствует отсутствию изменений), а максимальное – 29,246 %. Для гетерозиготных генотипов изменение частоты встречаемости замен в среднем мало отличалось от диких гомозиготных вариантов, составив 10,377 %. Такая же тенденция отмечена и в отношении минимального (0,005)

и максимального зарегистрированных изменений частоты встречаемости, составивших 25,266 %. Наибольшие изменения в частоте встречаемости выявлены нами для мутантных гомозиготных генотипов, которые составили целых 17,208 % в среднем. И, если минимальное изменение частоты было близким к нулю, то максимальный показатель был наибольшим из всех генотипов, составив 55,044 %.

Полученные результаты по изменению частоты встречаемости отдельных полиморфизмов могут связаны с продолжающейся селекционной работой в породе и дрейфом генов, который за несколько лет, прошедших после получения нами данных с ДНК-биочипов, привел к некоторому изменению частоты встречаемости выбранных для генотипирования локусов.

Корректировка перечня локусов для генотипирования секвенированием у овец российских пород и валидация новой панели у поколения 2022 года рождения. Редактирование набора локусов в составе панели генотипирования секвенированием для джалгинских мериносов затронуло только замены, используемые для оценки достоверности происхождения. Это связано с тем, что полиморфизмы, влияющие на продуктивные качества у овец, изначально встречаются с дисбалансом частоты минорных и главных аллелей. Они используются как маркеры в селекционном процессе и закрепление одного из аллелей с большей частотой встречаемости является целью маркерной селекции. Поэтому в составе нашей панели эти локусы используются именно в маркерных целях и позволяют контролировать наличие полиморфизмов, влияющих на продуктивность, в необходимом количестве для обеспечения эффективной селекционной работы.

Сам процесс редактирования локусов на панели генотипирования заключался в исключении из дальнейшего анализа полиморфизмов, имеющих самую низкую и самую высокую частоты встречаемости гомо- или гетерозиготного генотипа в отдельной породе с возможным приближением оставшихся замен к средней частоте встречаемости около 0,3, являющейся оптимальным уровнем для каждого из вариантов генотипов полиморфизма. В таком случае, каждый вариант генотипа по конкретной замене встречается приблизительно одинаково часто и исключены случаи, когда будет обнаруживаться только один вариант замены, так как тогда генотипирование с целью подтверждения достоверности происхождения по этой замене будет невозможно. В результате проведенного редактирования панели было исключено 116 локусов для генотипирования секвенированием овец породы джалгинский меринос. Для дальнейшей работы использовали 352 замены.

Проверка применения модифицированной панели локусов при генотипировании овец породы джалгинский меринос показала, что средняя частота встречаемости диких гомозиготных вариантов замен составила около 0,3 с разбросом индивидуальных значений от минимума 0,270 до максимума 0,340 (табл. 4).

Таблица 4 – Параметры генотипируемых для подтверждения достоверности происхождения SNP у баранов породы джалгинский меринос 2022 года рождения /

Table 4 – Parameters of genotyped SNP to confirm the authenticity of the origin in rams of the Dzhalginsky Merino breed born in 2022

Показатель / Index	Среднее / Average	Ошибка среднего / The error of the average	Min	Max
Частота встречаемости / Frequency of occurrence:				
диких гомозигот / wild homozygotes	0,305	0,016	0,270	0,340
гетерозигот / heterozygotes	0,372	0,031	0,340	0,440
мутантных гомозигот / mutant homozygotes	0,287	0,024	0,220	0,380
Частота дикого аллеля / The frequency of the wild allele	0,540	0,070	0,440	0,650
Частота мутантного аллеля / The frequency of the mutant allele	0,460	0,030	0,350	0,560

Для такого варианта генотипа это является очень хорошим результатом. Средняя частота встречаемости гетерозиготных генотипов составила 0,372, минимальная частота встречаемости – 0,340, наибольшее значение в выборке – 0,440. Так как частота встречаемости гетерозиготных генотипов была изначально

больше, по сравнению с гомозиготными (данные с ДНК-биочипов), то такой результат следует считать оптимальным для генотипирования. Средняя частота встречаемости мутантных гомозиготных вариантов замен у джалгинского мериноса составила 0,287 при минимумах на уровне 0,220 и максимумах около 0,380.

Подобный показатель мы также считаем очень хорошим, так как все полиморфизмы имеют достаточную частоту встречаемости и для использования при генотипировании следующих поколений джалгинских мериносов.

Анализ показателей генотипирования по полиморфизмам, связанным с показателями

мясной продуктивности у джалгинских мериносов 2022 года рождения, выявил, что средняя частота встречаемости замен с диким гомозиготным генотипом составила около 0,3, что не отличается от показателей генотипирования на предыдущем этапе исследования (табл. 5).

Таблица 5 – Параметры генотипируемых для оценки мясной продуктивности SNP у баранов породы джалгинский меринос 2022 года рождения /
Table 5 – The parameters of the genotyped SNP for assessing meat productivity in sheep of the Dzhalginsky Merino breed born in 2022

Показатель / Index	Среднее / Average	Ошибка среднего / The error of the average	Min	Max
Частота встречаемости / Frequency of occurrence:				
диких гомозигот / wild homozygotes	0,303	0,021	0,171	0,451
гетерозигот / heterozygotes	0,361	0,029	0,189	0,453
мутантных гомозигот / mutant homozygotes	0,388	0,030	0,046	0,672
Частота дикого аллеля / The frequency of the wild allele	0,470	0,060	0,220	0,760
Частота мутантного аллеля / The frequency of the mutant allele	0,530	0,070	0,240	0,880

Средняя частота встречаемости гетерозиготных генотипов по заменам увеличилась с 0,311 до 0,361. Но диапазон между минимальной и максимальной частотой встречаемости стал меньше, снизившись с 0,358 до 0,264. Мутантные гомозиготы встречались практически с той же частотой, что и у животных 2021 года рождения, с небольшим снижением с 0,406 до 0,388. Средняя частота каждого из аллелей почти не изменилась, они встречались почти с одинаковой частотой около 0,5. Минимальные и максимальные показатели частоты аллелей также были похожи на результаты для животных на предыдущем этапе генотипирования.

Использование генотипирования секвенированием в селекционной работе по улучшению продуктивных качеств овец российских пород требует определенного объема исследовательской работы. Нами ранее была подготовлена панель локусов, применимых при генотипировании джалгинских мериносов на основе данных, полученных с помощью ДНК-биочипов высокой плотности. Выбранные полиморфизмы были разделены на две группы. В первую вошли замены, не показавшие достоверной связи с показателями экстерьера животных, но встречающиеся с примерно равной частотой гомозиготных и гетерозиготных генотипов. Они были расположены по всем хромосомам и могли успешно характеризовать генотипы при определении достоверности

происхождения животных. Можно было сравнить их наличие у обоих предков и потомка, на основании чего сделать вывод о возможности формирования генотипа последнего. Вторая группа содержала полиморфизмы, которые имели достоверные связи с показателями продуктивности у овец породы джалгинский меринос. Их мы выявили самостоятельно в ходе предыдущих исследований на основе полногеномного поиска ассоциаций с использованием тех же ДНК-биочипов.

Настоящее исследование было посвящено оценке результатов генотипирования джалгинских мериносов с использованием выбранной панели локусов для оценки изменения их частоты встречаемости, по сравнению с полученными нами ранее данными на ДНК-биочипах. Так как между изучаемыми группами произошла смена нескольких поколений, было важно установить, какие из полиморфизмов обнаруживаются у животных с требуемой для качественного генотипирования частотой встречаемости, а какие утратили необходимую информативность в связи со снижением встречаемости одного из аллелей и дисбалансом частот выявляемых генотипов. Это касалось прежде всего замен из группы, применимой для подтверждения достоверности происхождения, так как у полиморфизмов, ассоциированных с мясной продуктивностью, изначально наблюдали дисбаланс встречаемости различ-

ных генотипов, что является необходимым условием для возможности использования этих SNP при селекционной работе. Для используемых при оценке происхождения полиморфизмов мы ставили несколько меньший, чем рекомендовал Tortereau et al. (2017) порог частоты встречаемости 0,3, приняв это значение приемлемым для среднего показателя частоты встречаемости выбранных замен в выборке животных [16].

Проведенное исследование показало, что большинство полиморфизмов для генотипирования с целью подтверждения достоверности происхождения сохранили свою информативность к 2022 году, когда было генотипировано поколение 2021 года рождения в возрасте 12 месяцев. Часть же полиморфизмов стали встречаться достаточно редко, чтобы использовать их при массовом генотипировании. Их было решено исключить из перечня исследуемых замен. Оставшееся количество полиморфизмов после коррекции составило 352. Это более чем в три раза превышает показатель, считающийся достаточным для достоверной оценки родства [17]. Мы полагаем такое количество полиморфизмов несколько избыточным для использования при массовом генотипировании, однако это позволяет иметь запас полиморфизмов, которые можно будет исключать при снижении их информативности в случае закрепления в породе одного из аллелей.

На втором этапе исследований модифицированная панель локусов показала, что у особей, обследованных в 2023 году, частота выявляемых замен находится в достаточных

пределах для получения достоверных результатов оценки родства у животных.

Оценка частоты встречаемости полиморфизмов, имеющих достоверную связь с показателями мясной продуктивности, между группами 2021 и 2022 года рождения показала, что большинство замен почти не различаются по частоте встречаемости между поколениями. Это связано с тем, что в обследованных хозяйствах пока не используется метод маркер-ассоциированной селекции для улучшения продуктивных качеств и причин для изменения частоты встречаемости полиморфизмов из исследуемой группы не было.

Заключение. Предложенная нами панель локусов, модифицированная после валидации на следующем поколении животных, содержит 352 замены, пригодные для генотипирования секвенированием и 413 полиморфизмов, ассоциированных с мясной продуктивностью животных. Полученные в результате исследований показатели частоты встречаемости замен в группе выбранных животных позволяют сделать заключение, что выбранные нами полиморфизмы находятся в локусах, не подверженных существенным перестройкам в течение нескольких поколений, и могут быть информативны в течение достаточно длительного времени. Использование разработанной нами панели позволит реализовать как официальные требования законодательства по определению достоверности происхождения в племенных хозяйствах, так и быть полезным в практических целях селекционерам при работе по повышению продуктивности породы джалгинский меринос.

References

1. Mrode R. A., Ojango J. M. K., Okeyo A. M., Mwacharo J. Genomic selection and use of molecular tools in breeding programs for indigenous and crossbred cattle in developing countries: current status and future prospects. *Frontiers in Genetics*. 2018;9:694. DOI: <https://doi.org/10.3389/fgene.2018.00694>
2. Braz C. U., Rowan T. N., Schnabel R. D., Decker J. E. Genome-wide association analyses identify genotype-by-environment interactions of growth traits in Simmental cattle. *Scientific report*. 2021;11(1):13335. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-92455-x>
3. Gao G., Gao N., Li S., Kuang W., Zhu L., Jiang W., et al. Genome-Wide Association Study of Meat Quality Traits in a Three-Way Crossbred Commercial Pig Population. *Frontiers in Genetics*. 2021;12:614087. DOI: <https://doi.org/10.3389/fgene.2021.614087>
4. Xu S.-S., Gao L., Shen M., Lyu F. Whole-Genome Selective Scans Detect Genes Associated With Important Phenotypic Traits in Sheep (*Ovis aries*). *Frontiers in Genetics*. 2021;12:738879. DOI: <https://doi.org/10.3389/fgene.2021.738879>
5. Al-Atiyat M. R. The power of 28 microsatellite markers for parentage testing in sheep. *Electronic Journal of Biotechnology*. 2015;18(2):116–121. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejbt.2015.01.001>
6. De Camargo G. M. F. The role of molecular genetics in livestock production. *Animal Production Science*. 2018;59(2):201–206. DOI: <https://doi.org/10.1071/AN18013>
7. Rahman M. A., Juyena N. S., Shmsuddin M., Bhuiyan M. M. U. Genomic tools and genetic improvement of crossbred Friesian cattle. *Research in Agriculture Livestock and Fisheries*. 2021;8(1):89–107. DOI: <https://doi.org/10.3329/ralf.v8i1.53271>
8. Gebrehiwot N. Z., Strucken E. M., Marshall K., Aliloo H., Gibson J. P. SNP panels for the estimation of dairy breed proportion and parentage assignment in African crossbred dairy cattle. *Genetics Selection Evolution*. 2021;53:21. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12711-021-00615-4>

9. Brito L. F., Clarke S. M., McEwan J. C., Miller S. P., Pickering N. K., Bain W. E., et al. Prediction of genomic breeding values for growth, carcass and meat quality traits in a multi-breed sheep population using a HD SNP chip. BMC Genomic Data. 2017;18:7. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12863-017-0476-8>
10. Clarke S. M., Henry H. M., Dodds K. G., Jowett T. W. D., Manley T. R., Anderson R. M., et al. A high throughput single nucleotide polymorphism multiplex assay for parentage assignment in New Zealand sheep. PLoS ONE. 2014;9(4):e93392. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0093392>
11. Heaton M. P., Leymaster K. A., Kalbfleisch T. S., Kijas J. W., Clarke S. M., McEwan J. C., et al. SNPs for Parentage Testing and Traceability in Globally Diverse Breeds of Sheep. PLoS ONE. 2014;9(4):e94851. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0094851>
12. De Donato M., Peters S. O., Mitchell S. E., Hussain T., Imumorin I. G. Genotyping-by-Sequencing (GBS): A Novel, Efficient and Cost-Effective Genotyping Method for Cattle Using Next-Generation Sequencing. PLoS ONE. 2013;8(5):e62137. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0062137>
13. Ciani E., Mastrangelo S., Da Silva A., Marroni F., Ferenčaković M., Ajmone-Marsan P., et al. On the origin of European sheep as revealed by the diversity of the Balkan breeds and by optimizing population-genetic analysis tools. Genetics Selection Evolution. 2020;52:25. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12711-020-00545-7>
14. Willis R. C. A., Burrell M., Swimley P., Siddavatam R. Modular automation solution for genotyping by sequencing for animal breeding. Proc. W. Cong. Gen. App. Livest. Prod. 2018;11:313.
15. Krivoruchko A., Likhovid A., Kanibolotskaya A., Saprikina T., Kizilova N., Kukharuk M., Yatsyk O. A genome-wide SNPs searching using the Illumina BeadChip in Jalgin Merino sheep breed. Bulgarian Journal of Agricultural Science. 2024;30(1):3–10.
16. Tortereau F., Moreno C. R., Tosser-Klopp G. Development of a SNP panel dedicated to parentage assignment in French sheep populations. BMC genetics. 2017;18:50. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12863-017-0518-2>
17. McClure M. C., McCarthy J., Flynn P., McClure J. C., Dair E., O'Connell D. K., Kearney J. F. SNP Data Quality Control in a National Beef and Dairy Cattle System and Highly Accurate SNP Based Parentage Verification and Identification. Frontiers in Genetics. 2018;9:00084. DOI: <https://doi.org/10.3389/fgene.2018.00084>

Сведения об авторах

Криворучко Александр Юрьевич, доктор биол. наук, главный научный сотрудник лаборатории геномной селекции и репродуктивной криобиологии в животноводстве, Всероссийский научно-исследовательский институт овцеводства и козоводства – филиал ФГБНУ «Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр», д. 15, пер. Зоотехнический, г. Ставрополь, Российская Федерация, 355017, e-mail: vniiok@fnac.center,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4536-1814>

✉ **Каниболоцкая Анастасия Александровна**, кандидат биол. наук, старший научный сотрудник лаборатории геномной селекции и репродуктивной криобиологии в животноводстве, Всероссийский научно-исследовательский институт овцеводства и козоводства – филиал ФГБНУ «Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр», д. 15, пер. Зоотехнический, г. Ставрополь, Российская Федерация, 355017, e-mail: vniiok@fnac.center,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3003-4175>, e-mail: dorohin.2012@inbox.ru

Скорых Лариса Николаевна, доктор биол. наук, главный научный сотрудник лаборатории геномной селекции и репродуктивной криобиологии в животноводстве, Всероссийский научно-исследовательский институт овцеводства и козоводства – филиал ФГБНУ «Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр», д. 15, пер. Зоотехнический, г. Ставрополь, Российская Федерация, 355017, e-mail: vniiok@fnac.center,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6090-4453>

Криворучко Ольга Николаевна, аспирант, Всероссийский научно-исследовательский институт овцеводства и козоводства – филиал ФГБНУ «Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр», д. 15, пер. Зоотехнический, г. Ставрополь, Российская Федерация, 355017, e-mail: vniiok@fnac.center,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4737-2982>

Information about the authors

Alexander Yu. Krivoruchko, DSc in Biology, chief researcher, the Laboratory of Genomic Breeding and Reproductive Cryobiology in Animal Husbandry, VNIIOK – branch North Caucasus Federal Agricultural Research Centre, 15, lane Zootechnical, Stavropol, Russian Federation, 355017, e-mail: vniiok@fnac.center, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-4536-1814>

✉ **Anastasia A. Kanibolotskaya**, PhD in Biology, senior researcher, the Laboratory of Genomic Breeding and Reproductive Cryobiology in Animal Husbandry, VNIIOK – branch North Caucasus Federal Agricultural Research Centre, 15, lane Zootechnical, Stavropol, Russian Federation, 355017, e-mail: vniiok@fnac.center,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3003-4175>, e-mail: dorohin.2012@inbox.ru

Larisa N. Skorykh, DSc in Biology, chief researcher, the Laboratory of Genomic Breeding and Reproductive Cryobiology in Animal Husbandry, VNIIOK – branch North Caucasus Federal Agricultural Research Centre, 15, lane Zootechnical, Stavropol, Russian Federation, 355017, e-mail: vniiok@fnac.center, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-6090-4453>

Olga N. Krivoruchko, graduate student, VNIIOK – branch North Caucasus Federal Agricultural Research Centre, 15, lane Zootechnical, Stavropol, Russian Federation, 355017, e-mail: vniiok@fnac.center,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4737-2982>

✉ – Для контактов / Corresponding author



Анализ показателей разнообразия STR-локусов в выборках производителей красной скандинавской и голштинской пород

© 2024. В. М. Кузнецов✉

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

Методами одно-двухмерной и многомерной статистики анализ и ровалистандартизированные показатели α - и β -разнообразия (y'_{km}), рассчитанные по микросателлитам ДНК (STR) в выборках быков красной скандинавской (RED, $n = 29$) и голштинской (HOL, $n = 45$) пород (в каждой по три субвыборки). Данные представляли две матрицы 11×7 : объекты – 11 STR-локусов (Eth3, Inra23, Tgla227, Tgla126, Sps115, Eth225, Tgla53, Bm2113, Bm1824, Eth10; №№1-11), переменные – три показателя α -разнообразия (число аллелей и эффективных аллелей на локус, гетерозиготность) и четыре – β -разнообразия (индексы: фиксации по Nei, дифференциации по Meirmans-Hedrick, Jost и Shannon-Sherwin). ANOVA по модели фиксированного типа выявил статистически значимое ($p_{value} < 0,02$) влияние на изменчивость y'_{km} факторов «порода» (2 %), «локус» (36,7 %) и их взаимодействие (15,6 %). По модели смешанного типа (фактор «локус» как случайный) статистически значимым установлен только эффект взаимодействия (25,8 %, $p_{value} < 0,0001$). Вероятность несовпадения номеров наугад выбранной пары локусов из RED- и HOL-выборок составила 31 %. Усреднённая евклидова дистанция между двумя выборками, рассчитанная по одномерным локусам, составила $37,8 \pm 5,35$ %. Корреляция Мантеля между матрицами парных межлокусных дистанций в RED- и HOL-выборках была $0,257 \pm 0,130$ ($p_{value} = 0,056$). Ординации локусов и их группировка (структурирование) в пространстве двух главных компонент выборки REL и выборки HOL отличались (прокрустов тест: $m^2 = 0,994$, $m_{12} = 0,747$, $r_{perm} = 0,164$, $r^2_{Proc} = 0,253$). Оценки расстояния между выборками по профилям показателей α - и β -разнообразия локусов не противоречили, в общем, генетическим дистанциям, рассчитанным по аллельным частотам (29–37 %). Для анализа ковариации (общности) многомерных данных RED и HOL выборок использовали двухблочный метод частных наименьших квадратов (2B-PLS). Интегрированные латентные переменные (LV) максимизировали общий квадрат ковариации («*squaredcovar*») = 14,3 %, в котором 83 % приходилось на первую LV с тах «весаами» по показателям α -разнообразия (αLV). На вторую LV приходилось 16,7 % с тах «весаами» по показателям β -разнообразия (βLV). Линейная связь между RED и HOL выборками по αLV составила 0,717 ($p_{value} = 0,013$), по βLV – 0,395 ($p_{value} = 0,229$), усреднённая – 0,56 ($p_{value} = 0,025$). Общность (ко-дисперсия) двух выборок по αLV и βLV оценивалась в 25,0–32,5 %. 2B-PLS-анализ по редуцированным данным (только по α -разнообразию) показал тах «*squaredcovar*» 0,393, в которой 99,9 % приходилось на первую LV (LV1). По LV1 линейная связь между RED- и HOL-выборками оценивалась в 0,659 ($p_{value} = 0,0253$), ко-дисперсия – в 43,4 % (по αLV была 51,4 %). Ординации локусов в пространстве координат выборок RED и HOL по полному (αLV) и редуцированному (LV1) набору данных имели хорошее соответствие (прокрустов тест: $m^2 = 0,0742$, $m_{12} = 0,0728$, $r_{perm} = 0,001$, $r^2_{Proc} = 0,927$). В структуре межвыборочной ковариации выделялись «сгустки» локусов с бутстрэп-вероятностью [группировки] 50, 75 и 100 %. Можно полагать, что RED и HOL выборки имели некоторую согласованность (конгруэнтность) по показателям α -разнообразия одноимённых локусов. Распространение «многомерного» подхода на описательную статистику α -разнообразия 7 пород молочного скота и 11 пород свиней показало достаточно хорошее соответствие результатов (индекс дифференциации, PCA-ординация) с таковыми, полученными при использовании «традиционных» методов (r_{perm} соответствия ординаций 0,054 и 0,004). Рассмотренные подходы и методы расширяют возможности популяционно-генетических [и селекционно-зоотехнических] исследований, в которых многомерные наборы данных являются нормой, а не исключением.

Ключевые слова: быки-производители, микросателлиты, локусы, α - и β -разнообразие, дисперсионный анализ, дистанции, анализ главных компонент, ординация, двухблочные частные наименьшие квадраты, прокрустов тест

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого» (№ гос. регистрации 1021060407726-4).

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

Конфликт интересов: автор заявил об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Кузнецов В. М. Анализ показателей разнообразия STR-локусов в выборках производителей красной и голштинской пород. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2024;25(3):465–482.

DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.3.465-482>

Поступила: 20.02.2024

Принята к публикации: 29.05.2024

Опубликована онлайн: 26.06.2024

Analysis of the diversity of STR-loci in the samples of bulls of Red Scandinavian and Holstein breeds

© 2024. Vasiliy M. Kuznetsov ✉

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

Standardized indicators of α - and β -diversity (y'_{km}) calculated by DNA microsatellites (STR) in samples of bulls of Red Scandinavian (RED, $n = 29$) and Holstein (HOL, $n = 45$) breeds (each with three sub-samples) were analyzed using one-two- and multivariate statistics methods. The data represented two 11×7 matrices: objects – 11 STR loci (Eth3, Inra23, Tgla227, Tgla126, Tgla122, Sps115, Eth225, Tgla53, Bm2113, Bm1824, Eth10; No.1-11), variables – three indicators of α -diversity (number of alleles and effective alleles per locus, heterozygosity) and four – β -diversity (indices: fixation by Nei, differentiation by Meirmans-Hedrick, Jost and Shannon-Sherwin). ANOVA, using a fixed-type model, revealed a statistically significant ($p_{value} < 0.02$) effect on the variability of y'_{km} factors «breed» (2 %), «locus» (36.7 %) and their interaction (15.6 %). According to the mixed-type model (the «locus» factor as random), only the interaction effect was statistically significant (25.8 %, $p_{value} < 0.0001$). The probability of a noncoincidence between the numbers of a randomly selected pair of loci from the RED and HOL samples was 31 %. The average Euclidean distance between the two samples, calculated by analogical loci, was 37.8 ± 5.35 %. The Mantel correlation between the matrices of paired interlocus distances in RED and in HOL samples was 0.257 ± 0.130 ($p_{value} = 0.056$). The ordinations of loci and their grouping (structuring) in the space of the two main components of the REL sample and the HOL sample differed (Procrust test: $m^2 = 0.994$, $m_{12} = 0.747$, $p_{perm} = 0.164$, $r^2_{Proc} = 0.253$). Estimates of the distance between samples based on the profiles of the α - and β -diversity of loci did not contradict, in general, the genetic distances calculated by allelic frequencies (29–37 %). To analyze the covariance (commonality) of multivariate RED and HOL sample data, a two-block partial least squares (2B-PLS) method was used. The integrated latent variables (LV) maximized the total square of covariance («squared covar» = 14.3 %), in which 83 % accounted for the first LV with max «weights» in terms of α -diversity (aLV). The second LV accounted for 16.7 % with max «weights» in terms of β -diversity (β LV). The linear relationship between RED and HOL samples for aLV was 0.717 ($p_{value} = 0.013$), for β LV – 0.395 ($p_{value} = 0.229$), averaged – 0.56 ($p_{value} = 0.025$). The commonality (co-dispersion) of the two samples for aLV and β LV was estimated at 25.0–32.5 %. 2B-PLS analysis based on reduced data (only for α -diversity) showed a max «squared covar» of 0.393, in which 99.9 % accounted for the first LV (LV1). According to LV1, the linear relationship between RED and HOL samples was estimated at 0.659 ($p_{value} = 0.0253$), the co-dispersion was 43.4 % (according to aLV it was 51.4 %). The ordinations of loci in the coordinate space of the RED and HOL samples for the complete (aLV) and reduced (LV1) datasets had a good match (Procrust test: $m^2 = 0.0742$, $m_{12} = 0.0728$, $p_{perm} = 0.001$, $r^2_{Proc} = 0.927$). In the structure of the inter-sample covariance, «clumps» of loci with a bootstrap probability of [grouping] 50, 75 and 100 % were distinguished. It can be assumed that the RED and HOL samples had some consistency (congruence) in terms of the α -diversity of the loci of the same name. The extension of the «multivariate» approach to descriptive statistics of α -diversity of 7 breeds of dairy cattle and 11 breeds of pigs showed a fairly good correspondence of the results (differentiation index, PCA-ordination) with those obtained using «traditional» methods (p_{perm} of matching ordinations 0.054 and 0.004). The approaches and methods considered expand the possibilities of population-genetic [and breeding-zootecnical] studies in which multidimensional data sets are the norm, not the exception.

Keywords: bulls, microsatellites, loci, α - and β -diversity, variance analysis, distances, principal component analysis, ordination, two-block partial least squares, Procrust test

Acknowledgements: the research was carried out under the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of the Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky (registrations No. 1021060407726-4).

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

Conflict of Interest: the author declared no conflicts of interest.

For citations: Kuznetsov V. M. Analysis of the diversity of STR-loci in the samples of bulls of Red and Holstein breeds. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2024;25(3):465–482. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.3.465-482>

Received: 20.02.2024

Accepted for publication: 29.05.2024

Published online: 26.06.2024

При изучении внутри- и межпородной генетической изменчивости по микросателлитам ДНК (Simple Tandem Repeats – простые тандемные последовательности; в дальнейшем STR) наборами данных являются выборки животных, генотипированных по 10–30 и более локусам. Для их анализа используют разные количественные меры популяционной генетики, которые характеризуют те или иные аспекты генетического разнообразия. Показатели разли-

чия/сходства выборок рассчитывают по каждому локусу. Затем объединяют по всем локусам – финальные оценки, на основе которых формируют выводы и рекомендации, например, по сохранению исчезающих пород. В публикациях оценок показателей разнообразия по каждому локусу (полокусных оценок), как правило, нет. Вместе с тем в совокупности они составляют многомерные данные, анализ которых методами традиционной и многомерной статистики может

дать дополнительную полезную информацию о локусах, именно: их различие и сходство, расщепление и структурирование в выборке (-ах).

В нашей предыдущей работе [1] генотипы по 11 локусам STR-маркеров ДНК 84 быков были использованы для полокусной оценки 14 показателей внутри- и межпородного разнообразия (α - и β -разнообразия). Была сформирована матрица данных 11×14 типа «объект-переменная», где «объект» – это локусы, а «переменная» – показатели разнообразия. К этому набору у многомерных данных был применён метод главных компонент. В результате анализа была получена локусная 2D ординация, в которой локусы *Tgla227* и *Tgla53* формировали группу А с бутстрэп-вероятностью 73 %; локусы *Tgla122*, *Eth225* и *Eth10* – группу В с вероятностью 100 %; локусы *Inra23*, *Bm2113* и *Bm1824* – группу С с вероятностью 73 %. Валидация ординации локусов проводилась по редуцированной матрице (11×7) методом неметрического многомерного шкалирования. Согласованность ординаций по прокрустову тесту составила 96 % ($p_{perm} = 0,001^1$), что позволило говорить о неслучайной координатной структуре локусов, характерной для данной выборки.

Цель настоящей работы – рассмотреть возможность использования полокусных показателей STR-разнообразия для сравнительного анализа пород. В частности, интерес представляли исследования: (а) влияния на изменчивость полокусных оценок факторов «порода», «локус» и взаимодействия «порода×локус»; (б) уровня различия/близости между породами по профилям разнообразия локусов; (в) соответствия/отличия ординаций (структурной организации) локусов разных пород; (г) наличия/отсутствия общности (ко-дисперсии) между многомерными наборами полокусных оценок.

Научная новизна – для решения поставленных вопросов в качестве исходных данных использовались оценки показателей аллельного

разнообразия по локусам (породам), которые анализировались методами традиционной и многомерной статистики. Подобных популяционно-генетических исследований в животноводстве ранее не проводилось.

Материал и методы. Использовали результаты генотипирования быков-производителей по 11 STR-локусам ДНК, представленные в открытом доступе на сайте ВНИИплем². Были отобраны данные только по быкам красной [скандинавской] (VikingRed; в дальнейшем – **RED**; $n = 29$ быков, представляющих три субвыборки: по 10 быков айрширской и красной датской пород, 9 – красной шведской) и голштинской (в дальнейшем – **HOL**; $n = 45$ быков, представляющих субвыборки: 13 быков немецкой, 17 – нидерландской и 15 быков американской селекции) породам³.

В обеих выборках по каждому локусу были рассчитаны семь показателей: n_a – фактическое число аллелей на локус; s_{n_e} – число эффективных аллелей на локус по энтропии [2]; H_e – гетерозиготность при равновесии Харди-Вайнберга [3]; $G'_{ST(N)}$ – индекс фиксации по Нею [4] и три индекса дифференциации [субвыборок]: G''_{ST} – по Вейру и Кокерхэму [5] с модификацией по [6]; D_{est} – по Джосту [7] и D' – по Шеннону/Шервину [8, 9]⁴.

Для анализа полученных оценок (переменных) использовали методы традиционной (описательная статистика, корреляционный и дисперсионный анализы) и многомерной (анализ главных компонент, двухблочный метод частных наименьших квадратов, корреляция Мантеля, прокрустовый анализ) статистики. Расчёты проводили с помощью компьютерных программ GenAlEx 6.502 [15, 16, 17], PAST3 [18], KyPlot 6.0 [19], PROTEST [20, 21], STATGRAPHICS®Centurion XVI⁵.

Результаты и их обсуждение. Преобразование данных. Сводные оценки показателей разнообразия/дифференциации по породам (Breed) были:

Breed	n_a	s_{n_e}	H_e	$G'_{ST(N)}$	G''_{ST}	D_{est}	D'
RED	6,7	4,25	0,683	0,005	0,016	0,011	0,184
HOL	7,0	4,54	0,724	0,015	0,058	0,039	0,142

¹ $p_{value}(p_{perm})$ – достигнутый уровень статистической значимости; в скобках – рассчитанный численным пермутационным методом с 999 рандомизированными перестановками данных.

²База генетических данных быков-производителей. Микросателлиты. [Электронный ресурс].

URL: <http://www.vniiplem.ru/rus/files/Database/DNK/mikrosatellity.pdf> (дата обращения: 09.12.2018).

³Из 22 тестов согласия распределений генотипов с равновесием Харди-Вайнберга (PXB) в одном случае имело место статистически значимое отклонение от PXB – по локусу *Eth225* в выборке голштинских быков из Германии.

⁴Методы расчёта были рассмотрены в [10, 11, 12, 13, 14].

⁵STATGRAPHICS® Centurion XVI User Manual. By StatPoint Technologies, Inc. 2010. 297 p.

Первые три переменные характеризовали внутрипородное α -разнообразие, остальные – β -разнообразие. Переменная $G'_{ST(N)}$ указывала на вероятность фиксации аллелей в локусе, переменные G''_{ST} , D_{est} и D' – на уровни дифференциации субвыборок в пределах породных выборок.

Характеризуя те или иные аспекты генетического разнообразия, показатели имели разные шкалы и единицы измерения. Это делало невозможным их статистическую обработку. Поэтому все оценки по локусам-переменным (y_{km}) были преобразованы в безразмерные величины (y'_{km})⁶ с параметрами распределения: среднее = 100, стандартное отклонение = 10 (табл. 1).

Таблица 1 – Преобразованные оценки показателей разнообразия локусов /
Table 1 – Transformed estimates of loci diversity indicators

Breed	Locus	Nº	n_a	s_{n_e}	H_e	$G'_{ST(N)}$	G''_{ST}	D_{est}	D'
RED	Eth3	1	95,5	97,2	99,0	112,9	111,2	111,1	107,1
	Inra23	2	90,4	91,1	86,7	111,4	104,5	103,1	113,9
	Tgla227	3	110,3	112,7	111,4	93,6	92,0	91,8	107,7
	Tgla126	4	95,5	92,5	95,2	80,7	82,2	83,8	85,2
	Tgla122	5	97,7	95,2	97,1	80,7	81,6	83,5	93,2
	Sps115	6	88,1	87,1	79,0	88,6	90,9	92,7	97,1
	Eth225	7	105,1	107,3	107,6	106,4	110,4	111,3	109,4
	Tgla53	8	107,3	105,3	103,8	96,4	96,5	96,7	110,3
	Bm2113	9	100,0	103,3	105,7	98,6	99,2	99,8	104,1
	Bm1824	10	92,6	89,1	85,7	106,4	101,6	100,4	94,4
	Eth10	11	100,0	106,7	108,6	94,3	94,7	94,2	112,7
HOL	Eth3	1	92,6	90,4	94,3	98,6	97,4	97,5	82,4
	Inra23	2	95,5	97,9	102,9	115,7	115,5	117,3	97,7
	Tgla227	3	117,7	115,4	110,5	107,1	114,3	115,8	104,5
	Tgla126	4	85,2	85,7	84,8	95,7	96,2	95,3	83,3
	Tgla122	5	112,5	110,7	111,4	97,9	100,0	99,8	95,8
	Sps115	6	92,6	91,1	91,4	105,0	103,0	100,9	91,2
	Eth225	7	97,7	95,2	97,1	113,6	110,5	109,6	105,2
	Tgla53	8	125,1	122,2	113,3	100,7	107,2	106,7	113,0
	Bm2113	9	102,9	102,6	108,6	84,3	82,6	79,8	87,4
	Bm1824	10	90,4	93,8	97,1	102,1	102,4	100,5	96,2
	Eth10	11	105,1	107,3	108,6	102,9	106,5	106,4	106,7

Данные таблицы 1 представляли не только два набора чисел по породам, к которым применимы методы традиционной (одно-двухмерной) статистики, но и две матрицы многомерных данных типа «объект-переменная» размерностью 11×7. Во втором случае объектами являлись 11 локусов, а переменными/признаками – 7 мер, оценивающих разные грани одного исходного «конструкта» – STR-разнообразия.

Каждый вектор-столбец – это профиль m -го показателя разнообразия по 11 локусам;

каждый вектор-строка – профиль k -го локуса по семи преобразованным оценкам разнообразия. Последние рассматривали в качестве набора «производственных» показателей, характеризующих локус как оценщика STR-разнообразия. Объекты-локусы в семимерном признаковом пространстве без методов многомерной статистики невозможно геометрически (графически) отобразить и выявить наличие каких-либо отклонений от случайного рассеивания (закономерности).

⁶ $y'_{km} = 100 + [(y_{km} - \mu_m) / \sigma_m] \times 10$, где y_{km} – оригинальная оценка m -го показателя по k -ому локусу; y'_{km} – преобразованная оценка; μ_m и σ_m – среднее и стандартное отклонение по m -му показателю. Преобразование обеспечило соизмеримость переменных с различными средними и дисперсиями в рамках их совместной обработки без какой-либо потери информации.

Тесты на нормальность. Данные таблицы 1 были проверены на нормальность распределения. Одномерный тест Жарке-Бера⁷ показал величины достигнутой статистической значимости (p_{value}) по локусам для RED-выборки в диапазоне от 0,588 до 0,877, для HOL-выборки – 0,535–0,806. Проверка на нормальность распределения матриц RED и HOL (каждая с размерностью 11×7) комплексным критерием Доорника-Хансена (Doornik-Hansen) показала величины p_{value} 0,8 и 0,483 соответственно. Все значения p_{value} были больше принятого критического уровня статистической значимости ($\alpha = 0,05$). Следовательно, можно полагать, что данные получены из нормально распределенных совокупностей. Для проверки эквивалентности ковариационных матриц двух многомерных выборок был

использован М-критерий Бокса (Box's M Test). Он составил 58,6 при $p_{value} = 0,118 > \alpha = 0,05$, что указывало на эквивалентность ковариационных матриц. Таким образом, анализируемые наборы данных соответствовали совокупности допущений, позволяющих применять параметрические методы статистики.

Описательная статистика. На рисунке 1 визуализирована описательная статистика по RED- и HOL-выборкам. Различие между средними выборок было небольшим (рис. А). В пределах выборок имела место вариация комплексных средних по локусам (рис. В). При этом средние в HOL-выборке были в 7 случаях из 11 выше. Вместе с тем, относительная изменчивость в обеих выборках отмечена на уровне 7,5 %.

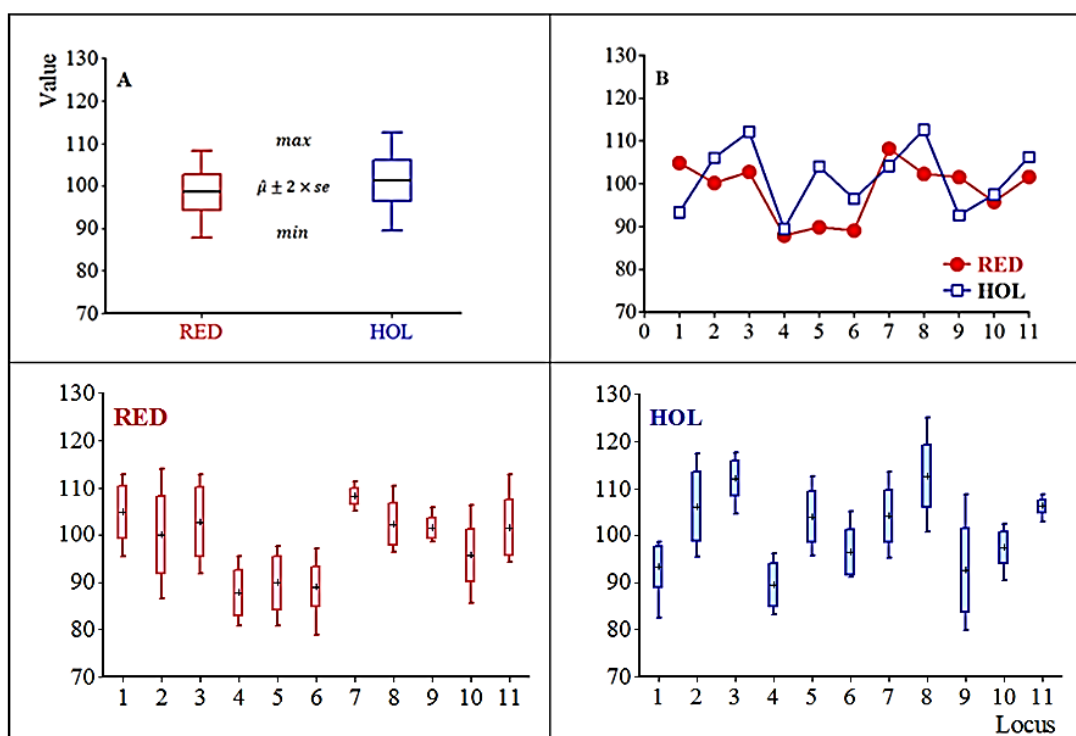


Рис. 1. Графики средних по выборкам (А), локусам (В) и изменчивости полокусных оценок разнообразия в выборках (RED, HOL) /

Fig. 1. Graphs of averages by samples (A), loci (B) and variability of estimates of diversity by loci in samples (RED, HOL)

Диаграммы размаха (рис. 1, RED и HOL) демонстрировали примерно равный разброс преобразованных оценок в пределах локусов, именно: по RED-выборке в диапазоне от 6,2 до 27,2 ед., по HOL-выборке – от 5,7 до 28,8 ед. В то же время имело место наличие существенных различий изменчивости оценок одно-

порядковых локусов. Так, в RED-выборке по локусу 1 размах составил 20,9, в HOL-выборке – 13,2 ед. По локусу 7 соответственно 6,2 и 18,4 (различие в 3 раза), по локусу 9 – 7,1 и 28,8 (в 4 раза), по локусу 11 – 18,5 и 5,7 ед. (в 3,2 раза).

⁷Тест Jarque-Bera (Жарке-Бера, Харке-Бера) – статистический тест, проверяющий ошибки наблюдений на нормальность посредством сверки их третьего момента (асимметрия) и четвёртого момента (эксцесс) с моментами нормального распределения. Если p_{value} больше принятого критического α -уровня, то нулевая гипотеза (H_0) о том, что данные получены из нормально распределённой совокупности, не может быть отвергнута.

Однофакторный дисперсионный анализ (Analysis Of Variance, ANOVA). Цель ANOVA – проверка статистической значимости различий между средними градаций/групп фактора (-ов). ANOVA осуществляет декомпозицию общей суммы квадратов отклонений данных от среднего (Total Sum of Squares, SS_T). Одна часть представляет внутригрупповую изменчивость, которую интерпретируют как «остаток» (Residual) или «случайная ошибка» (SS_e). Вторая – вариацию средних по группам (например, локусам – SS_L). Их деление на соответствующие числа степеней свободы (Df) даёт средние квадраты (Mean Square, MS), которые используют для проверки H_0 -гипотезы по критерию Фишера ($F = MS_L/MS_e$). Если градации изучаемого фактора были *случайно* отобраны,

то рассчитывают varianсы ($\hat{\sigma}_L^2$, $\hat{\sigma}_e^2$) и коэффициент внутриклассовой корреляции (Intraclass Correlation Coefficient, $ICC = \hat{\sigma}_L^2/(\hat{\sigma}_L^2 + \hat{\sigma}_e^2)$), по которому определяют внутригрупповую надёжность переменных и связанность их средних уровней.

В таблице 2 представлены результаты ANOVA по однофакторной статистической модели (фактор «Locus» рассматривался как рандомизированный – локусы отобраны случайно). Тест Фишера показал статистически значимое влияние фактора «Locus» на изменчивость y'_{km} -оценок в обеих выборках ($p_{value} < 0,0001$). Оценки остаточных varianс ($\hat{\sigma}_e^2$) были практически равными, а межлокусная varianса ($\hat{\sigma}_L^2$) в HOL-выборке была на 37,7 % больше, чем в RED-выборке.

Таблица 2 – Однофакторная ANOVA по RED- и HOL-выборкам /

Table 2 – Single-factor ANOVA for RED and HOL samples

RED / Source:	SS	Df	MS	F	p _{value}	$\hat{\sigma}^2$	ICC	95% CI
Locus (L)	3314,33	10	331,43	6,55	<0,0001	40,12	*0,44 **0,85	[0,21, 0,74] [0,65, 0,95]
Residual (e)	3338,38	66	50,58	-	-	50,58		
Total (T)	6652,71	76	-	-	-	-		
HOL / Source:	SS	Df	MS	F	p _{value}	$\hat{\sigma}^2$	ICC	95% CI
Locus (L)	4382,54	10	438,25	8,50	<0,0001	55,24	*0,52 **0,88	[0,28, 0,79] [0,73, 0,96]
Residual (e)	3404,28	66	51,58	-	-	51,58		
Total (T)	7786,82	76	-	-	-	-		

* Надёжность оценки локуса по одному показателю (ICC_{Ind}); ** надёжность усреднённой оценки по семи показателям (ICC_M). Пояснения в тексте /

* Reliability of locus estimation by one indicator (ICC_{Ind}); ** reliability for an average estimate by seven indicators (ICC_M). Explanations in the text.

Индивидуальный коэффициент внутриклассовой корреляции, ICC_{Ind} (в табл. 2 помечены «*»), по RED-выборке составил 0,44, по HOL-выборке – 0,52. «Фундаментальная» интерпретация ICC_{Ind} – это мера доли общей изменчивости, которая относится к объектам оценивания [22], в данном случае – к локусам. 95-процентные доверительные интервалы оценок (95 % CI) перекрывались, что указывало на статистически незначимое различие ICC_{Ind} по выборкам. «Истинные» значения ICC_{Ind} с доверительной вероятностью 95 % находились в диапазоне 0,21...0,79⁸.

Межлокусная varianса ($\hat{\sigma}_L^2$) выражала ту изменчивость, которая являлась общей для индивидуальных оценок одного и того же локуса. Поэтому ICC_{Ind} можно также интерпретировать как меру абсолютного согласия (absolute agreement) или гомогенности (homogeneity) оценок показателей разнообразия по локусам, как надёжность (reliability) индивидуальной (y'_{km}) оценки⁹. По [23] величина $ICC < 0,5$ считается низкой, 0,5–0,75 – средней, 0,75–0,90 – хорошей, >0,90 – отличной. Следовательно, при 95% CI [0,21, 0,79] категория надёжности индивидуальных оценок может быть от «низкой» до «хорошей».

⁸Отметим, что в ANOVA σ_e^2 предполагает остаточную изменчивость, связанную с неизвестными и случайными причинами (ошибку). В действительности σ_e^2 была следствием, главным образом, вариации y'_{km} из-за использования семи мер разнообразия. Поэтому величину $(1-ICC_i)$ можно рассматривать как долю общей дисперсии, обусловленную фактором «метод».

⁹Альтернативой ICC_{Ind} является парная корреляция Пирсона. Усреднённые коэффициенты корреляции y'_{km} -оценок между методами были: по RED-выборке – 0,45, по HOL-выборке – 0,52.

Надёжность средних по семи y'_{km} -оценкам локуса, ICC_M (в табл. 2 помечены «**»), составила по RED-выборке 0,85, по HOL-выборке – 0,88. Различие в ICC_M было статистически незначимо. «Истинная» величина ICC_M с доверительной вероятностью 95 % находилась в диапазоне [0,65, 0,96], т. е. ICC_M может иметь категорию надёжности «средняя» и выше.

Интерес представляли величины ICC_M конкретных локусов. Приблизительные оценки были получены, заменив SS_e на $SS_k \times 11/7$, где SS_k – сумма квадратов по k -ому локусу. Оценки варьировали от 0,60 до 0,95 (рис. 2). По голштинской породе ICC_M были выше, за исключением локусов 3, 8 и 9. Высокие ICC_M локусов в одной выборке не были таковыми в другой.

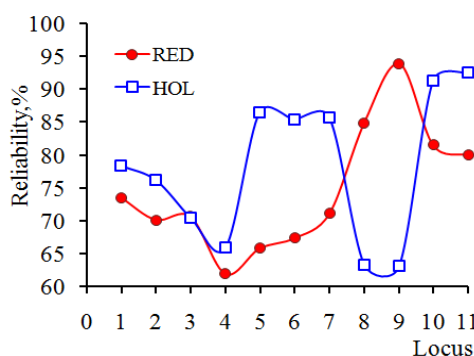


Рис. 2. Вероятный ICC_M по локусам /
Fig. 2. Probable ICC_M by loci

Двухфакторный ANOVA по фиксированной модели. Данные по выборкам были объединены и обработаны двухфакторной моделью ANOVA: $y = \mu + BR + L + I + e$, где $y = y'_{km}$; μ – общее среднее; BR – эффект породы; L – эффект локуса; I – эффект взаимодействия ($Interaction = BR \times L$); e – Residual. Все эффекты, кроме Residual, были фиксированные¹⁰. Результаты представлены в таблице 3.

Влияние каждого фактора было статистически значимым ($p_{value} < 0,02$). Долю (вклад) каждого фактора, $\eta_i^2 = SS_i/SS_T$, также называют «частным коэффициентом детерминации». BR -фактор объяснял 2,0 % общей суммы квадратов, L -фактор – 36,7 %, взаимодействие $BR \times L$ – 15,6 %¹¹. Так как суммы квадратов относились к III типу, то вклад каждого фактора не включал влияние других факторов.

Корень квадратный из $(\eta^2/100)$ даёт оценку силы [нелинейной] связи между фактором и зависимой переменной. Для определения тесноты связи использовали шкалу Чеддока:

Значение	Связь	Значение	Связь
$\eta = 0$	Отсутствует	$0,5 \leq \eta < 0,7$	Заметная
$0 < \eta < 0,2$	Очень слабая	$0,7 \leq \eta < 0,9$	Сильная
$0,2 \leq \eta < 0,3$	Слабая	$0,9 \leq \eta < 1$	Весьма сильная
$0,3 \leq \eta < 0,5$	Умеренная	$\eta = 1$	Функциональная

Таблица 3 – Двухфакторный ANOVA по фиксированной модели (RED + HOL) /
Table 3 – Two-factor fixed-model ANOVA (RED + HOL)

Source (Fix)	SS	η^2 , %	Df	MS	F	pvalue
Breed (BR)	296,54	2,0	1	296,54	5,81	0,0174
Locus (L)	5402,15	36,7	10	540,22	10,58	<0,0001
Interaction (BR×L)	2294,71	15,6	10	229,47	4,49	<0,0001
Residual (e)	6742,66	45,7	132	51,08	-	-
Total (T)	14736,06	100,0	153	-	-	-

Между BR -фактором и полокусными оценками $\eta_{BR} = 0,14$, что характеризовало соотношение как «очень слабое». Оценки для η_L и $\eta_{BR \times L}$ были соответственно 0,6 и 0,4, что определяло взаимосвязи как «умеренно-заметные».

Показателем адекватности и надёжности статистической модели ANOVA является коэф-

фициент детерминации ($R^2 = 1 - SS_e/SS_T$, т. е. суммарная доля всех факторов в SS_T). Он составил 54,3 %, а величина $\sqrt{0,543} = 0,74$ представляла собой множественный коэффициент корреляции между полокусными оценками и всеми факторами модели. По шкале Чеддока теснота связи характеризовалась как «сильная».

¹⁰Статистические модели фиксированного типа используют для оценки эффектов не случайно выбранных градаций факторов; выводы распространяются только на анализируемые данные. Случайные (рандомизированные) статистические модели используют для оценки варiances (σ^2); выводы распространяются на популяцию. Смешанные модели используют для одновременной оценки эффектов фиксированных факторов и варiances компонент случайных факторов.

¹¹Взаимодействие – влияние изменения значений одного фактора на величину эффекта, обусловленного воздействием другого фактора (эффект возникает, когда зависимость между фактором В и признаком изменяется под воздействием фактора А).

Межпородные различия по локусам. Влияние породы производителей на вариацию полокусных оценок было статистически значимым ($p_{value} < 0,02$). Однако это не означало, что каждая средняя по локусу в выборке RED значимо отличалась от средней аналогичного локуса в выборке HOL. Были проведены дополнительные тесты. В частности,

в таблице 4 представлены результаты проверки H_0 различий между RED- и HOL-выборками парным тестом Стьюдента. Статистически значимая разность ($p_{value} \leq 0,05$) была выявлена по локусам 1, 3, 5, 6, 8 и 9¹². Средневзвешенное по локусам различие составило -2,3 ед. ($p_{value} = 0,003$) с 95 % доверительным интервалом [-4,2, -0,3].

Таблица 4 – Парный тест Стьюдента по локусам RED- и HOL-выборок /
Table 4 – Student's paired test by loci of RED- and HOL-samples

Locus	RED		HOL		$\Delta = \mu_R - \mu_H$	95% CI для Δ		p_{value} Δ
	μ_R	$\pm s.e.$	μ_H	$\pm s.e.$		lower	upper	
1	104,9	2,6	93,3	1,9	11,5	5,1	17,9	0,004
2	100,2	3,8	106,1	3,4	-5,9	-15,9	4,1	0,267
3	102,8	3,5	112,2	1,7	-9,4	-17,1	-1,7	0,034
4	87,9	2,3	89,5	2,0	-1,6	-7,5	4,3	0,609
5	89,9	2,8	104,0	2,5	-14,2	-21,5	-6,8	0,003
6	89,1	2,0	96,5	2,1	-7,4	-13,1	-1,6	0,027
7	108,2	0,8	104,1	2,5	4,1	-1,1	9,3	0,151
8	102,3	2,0	112,6	3,0	-10,3	-17,4	-3,2	0,015
9	101,5	1,0	92,6	4,1	8,9	0,8	17,1	0,050
10	95,7	2,6	97,5	1,6	-1,8	-7,7	4,2	0,576
11	101,6	2,8	106,2	0,6	-4,6	-10,1	0,9	0,128
μ_w	102,5	0,49	103,7	0,49	-2,3	-4,2	-0,3	0,003

Примечания: μ – среднее; $s.e.$ – стандартная ошибка; 95%CI – 95% доверительный интервал (бутстрэппинг); μ_w – средневзвешенное по локусам с «весами» $1/s.e.^2$.

Notes: μ – the average; $s.e.$ – the standard error; 95% CI is the 95% confidence interval (bootstrapping); μ_w – the weighted average of loci with «weights» of $1/s.e.^2$.

Тест Уилка (Wilks's) многомерного дисперсионного анализа (Multivariate Analysis Of Variance, MANOVA)¹³ также показал статистически значимое различие RED- и HOL-выборок ($\lambda = 0,252$, $F = 5,93$, $p_{value} = 0,0024$). Дополнительно был использован непараметрический вариант MANOVA (NPMANOVA или PERMANOVA), если предположения о многомерном нормальном распределении и равных ковариационных матрицах всё же не выполнялись. Равенство средних проверялось пермутационным тестом с 999 повторами и мерой квадрата расстояния Махаланобиса. Тест подтвердил статистически значимое различие выборок ($F = 2,39$, $p_{perm} = 0,0019$). В то же время непараметрический тест Хотеллинга на равенство средних двух парных многомерных наборов данных (Paired Hotelling's test) по локусам со схожими номерами (пара – первая строка RED-выборки и первая строка HOL-выборки табл. 1 и т. д.) показал при критерии $T^2 = 93,4$ $p_{value} = 0,062$.

Двухфакторный ANOVA по смешанной модели. Если принять фактор «локус» как случайный (random factor), то эффект взаимодействия $BR \times L$ также будет случайным, а модель ANOVA будет относиться к смешанному типу (MixedModel, MM). Результаты ANOVA-MM (табл. 5) показали влияние BR-фактора на полокусные оценки разнообразия статистически незначимым ($p_{value} = 0,2821$). По L-фактору p_{value} было тоже больше 0,05, но меньше 0,1. Только эффект $BR \times L$ однофакторно отличался от нуля ($p_{value} < 0,0001$). В таких случаях говорят, что «не доказано отсутствие эффектов [главных факторов]» [24].

¹²С поправкой Бонферрони ($\alpha_{Bonf} = 0,05/11 = 0,0045$) только по локусам 1 и 5.

¹³MANOVA является обобщением обычного одномерного ANOVA и предназначен для выявления различий между группами по совокупности средних значений комплекса признаков. H_0 заключается в предположении о равенстве векторов средних значений для сравниваемых групп наблюдений.

Таблица 5 – Двухфакторный ANOVA-MM объединённой выборки /
Table 5 – Two-factor ANOVA-MM of the combined sample

Source	SS	Df	MS	F	pvalue	$\hat{\sigma}^2$
Breed (BR)	296,54	1	296,54	1,29	0,2821	-
Locus (L)	5402,15	10	540,22	2,35	0,0965	22,20
Interaction (BR×L)	2294,71	10	229,47	4,49	<0,0001	25,48
Residual (e)	6742,66	132	51,08	-	-	51,08
Total (T)	14736,06	153	-	-	-	98,76

При раздельном анализе RED- и HOL-выборок (табл. 2) варианса y'_{km} -оценок, обусловленная L-фактором ($\hat{\sigma}_L^2$), составила в среднем $(40,12 + 55,24)/2 = 47,68$. Анализ объединённой выборки по ANOVA-MM разделил этот компонент изменчивости на части: одна – межлокусная, которая оказалась почти вдвое меньше – 22,20, другая – взаимодействия, равная 25,48. Эффект $BR \times L$ рассчитали из отношения $\frac{\hat{\sigma}_{BR \times L}^2}{\hat{\sigma}_L^2} 100 = \frac{25,48}{98,76} 100 = 25,8 \%$.

Его можно интерпретировать как меру несоответствия профилей разнообразия локусов, т. е. меру различий RED- и HOL-выборок.

Эффекты взаимодействия визуализированы на рисунке 3. Действительное взаимодействие наблюдали в отношениях таких локусов, как 3 и 7, 1 и 5 и др., т. е. когда [условные] ранги оценок в RED-выборке повышались/снижались в HOL-выборке. Так, высокие в RED-выборке оценки по локусам 1, 7 и 9 снизились в HOL-выборке, но значительно повысились оценки локусов 2, 3, 5, 6, 8 и 11 (табл. 4). В случаях, когда различие между оценками локусов в другой породе увеличивалось или снижалось, но последовательность рангов не менялась (локусы 7 и 1, 10 и 4 и т. п.), имела место корреляция «порода-локус».

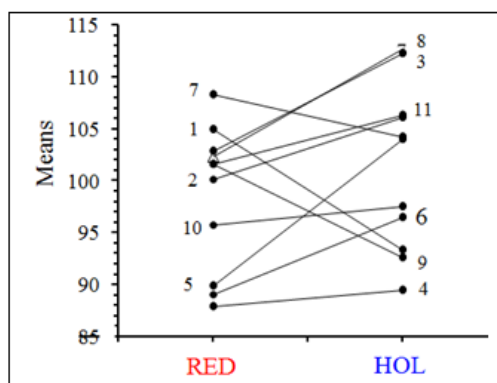


Рис. 3. Эффекты «порода×локус» /
Fig. 3. The effects of «breed×locus»

Ранговая корреляция Кендалла оценок одноимённых локусов между выборками составила $\tau = 0,382$ ($p_{value} = 0,1021$). Корреляция τ имеет интересную интерпретацию: если два объекта выбираются случайно из группы n объектов, то разность между вероятностью того, что они будут иметь одинаковый порядок как по X, так и по Y (P_S) и вероятностью того, что у них будет наблюдаться различие в порядках по X и Y (P_D) равна величине τ [25]. Исходя из отношения $\tau = P_S - P_D$ были рассчитаны вероятности совпадения $P_S = (1 + 0,382)/2 = 0,69$ и не совпадения (различия) $P_D = 1 - 0,69 = 0,31$ номеров *наугад* выбранной пары локусов из RED- и HOL-выборок. Имело место близость оценок $P_D = 0,31$ и взаимодействия $BR \times L = 0,258$ из ANOVA-MM. Как представляется, P_D также можно рассматривать в качестве меры различия породных выборок по профилям разнообразия одноимённых локусов.

Евклидовы дистанции. По каждой выборке были рассчитаны евклидовы дистанции¹⁴ между локусами (табл. 6).

В RED-выборке межлокусные дистанции варьировали от 11,7 до 111,9 %, имели среднее $48,2 \pm 3,32 \%$ и 95 % CI [41,5; 54,8]. В HOL-выборке дистанции были в диапазоне 8,3–162,4 % со средней $63,4 \pm 5,07 \%$ и 95 % CI [53,2; 73,6]. Парный тест Стьюдента показал статистически значимое различие между средними (HOLvsRED), именно: $15,3 \pm 5,3 \%$, $p_{value} = 0,0057$, 95 % CI [4,6; 25,9]. С другой стороны, корреляция Мантеля¹⁵ между треугольными матрицами была $R_M = 0,257 \pm 0,130$ с 95 % CI [-0,009; 0,506] ($p_{value} = 0,056$). Расстояния между профилями локусов в выборке RED были слабо зависимы от расстояний между аналогичными профилями локусов в выборке HOL (и наоборот).

В таблице 7 представлены евклидовы кросс-дистанции между локусами двух выборок.

¹⁴Формула расчёта: $d_{Euclid} = \sqrt{\sum (y'_{km} - y'_{lm})^2}$. Предварительно y_{km} -оценки были выражены в процентах от среднего (μ_m).

¹⁵Метод Мантеля или «соотношение квадратов» (quadratic assignment) проверяет H_0 , что дистанции между объектами в матрице A независимы от дистанций между теми же самыми объектами в матрице B.

Таблица 6 – Дистанции Евклида между локусами в выборке RED (над диагональю) и в выборке HOL (под диагональю) /
Table 6 – Euclidean distances between loci in the RED-sample (above the diagonal) and in the HOL-sample (below the diagonal)

Locus	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1		31,3	67,7	33,0	29,0	52,2	42,9	42,7	27,1	35,9	38,9
2	34,1		94,9	31,9	36,5	23,8	72,3	68,6	55,1	14,4	65,7
3	107,4	80,7		80,7	69,5	111,9	28,3	28,0	41,8	97,5	33,3
4	28,4	58,4	134,1		11,7	37,4	63,8	56,1	44,0	26,6	54,6
5	87,0	63,1	24,7	114,3		46,3	53,7	45,0	34,1	34,2	44,2
6	8,3	31,9	106,0	28,6	86,7		91,7	85,9	73,3	19,0	83,9
7	26,9	15,3	85,1	51,4	67,2	23,2		16,5	21,6	75,8	20,0
8	135,9	110,4	30,4	162,4	50,2	134,6	114,2		20,7	70,8	20,9
9	54,0	41,1	64,2	80,6	40,0	55,7	42,8	89,1		58,4	13,5
10	15,6	24,5	101,2	36,0	81,4	13,9	21,5	129,9	49,9		70,2
11	68,5	41,3	42,1	94,9	23,8	67,2	46,9	70,2	29,8	60,5	

Таблица 7 – Евклидовы дистанции между локусами выборок RED (X) и HOL (Y) /
Table 7 – Euclidean distances between the sample loci RED (X) and HOL (Y)

Locus	X: 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Y: 1	30,5	23,1	89,9	16,9	25,5	30,1	68,9	64,5	50,1	16,0	62,0
2	9,4	38,4	66,3	37,7	33,9	58,5	40,5	43,0	26,3	41,8	38,3
3	83,3	111,5	29,4	100,7	90,3	129,6	41,7	46,2	61,8	113,5	56,6
4	54,0	29,0	116,3	39,7	50,0	15,3	95,1	90,8	76,1	23,3	87,0
5	65,4	93,5	13,2	78,8	68,2	110,5	25,8	26,3	41,2	94,8	36,5
6	26,9	16,0	89,4	21,0	27,5	27,9	67,2	63,3	49,2	11,2	61,2
7	9,2	29,1	70,5	29,6	26,4	48,8	46,3	43,9	31,3	31,2	43,9
8	112,4	139,6	50,4	127,6	116,8	157,1	70,4	72,7	89,5	141,8	82,3
9	41,5	64,6	40,7	42,9	32,7	78,2	33,4	24,8	20,8	64,5	23,8
10	20,3	21,1	83,0	23,3	26,4	37,1	60,7	58,6	41,5	24,1	52,3
11	43,5	72,7	25,9	62,5	52,2	91,6	4,4	14,6	20,1	75,9	17,5

Все дистанции ($n = 121$) находились в диапазоне от 4,4 (RED:L7-HOL:L11) до 157,1 % (RED:L6-HOL:L8). Усреднённая оценка, характеризующая степень различия между двумя случайно выбранными локусами из RED- и HOL-выборок, была $\bar{d} = 54,0 \pm 2,97\%$ с 95 % CI [48,1; 59,9]. Усреднённая дистанция, рассчитанная по одномерным локусам (диагональ), составила $\bar{d}' = 37,8 \pm 5,35\%$ с 95 % CI [27,9; 57,5]. Евклидовы кросс-дистанции также были рассчитаны по редуцированным данным: переменным α -разнообразия (n_a , s_{n_e} и H_e). Усреднённая дистанция по одномерным локусам была $34,1 \pm 6,25\%$ с 95 % CI [20,4; 47,8]. Две последние оценки (в долях – 0,378 и 0,341)

хорошо согласовывались с полученными ранее индексами генетической дифференциации RED- и HOL-выборок – 0,29-0,37 [14]¹⁶.

Анализ главных компонент (Principal Components Analysis, PCA). С помощью процедуры PCA: (а) рассчитали корреляцию между переменными; (б) сгенерировали новые латентные переменные (факторы, компоненты) как линейные комбинации исходных переменных; (в) снизили размерность, выявив два главных компонента, объясняющих максимум общей дисперсии исходных данных; (г) спроецировали ординацию объектов-локусов в пространстве главных компонент.

¹⁶Отметим также, что усреднённая дистанция, рассчитанная только по s_{n_e} , была 0,28, по H_e – 0,15. Последняя оценка близка к значению индекса фиксации аллелей, рассчитанному по AMOVA (Analysis of MOlecular VAriance), 0,11 [13].

На рисунке 4 представлены ординации локусов в системе координат двух главных компонент (PC1 и PC2). В первом ряду даны ординации локусов в RED- и HOL-выборках (близкие точки-локусы обладали более сходными свойствами). Суммарная информативность PC1 и PC2 составила 92,5 и 95,0 % соответственно. Вероятные цепочки отношений между локусами визуализировали некорневые графы, построенные методом «минимального остовного дерева» (Minimum Spanning Tree, MST). MST-метод использовали для (а) корректной группировки (структурирования) локусов и

(б) лучшего восприятия различий. Ординации существенно различались и по конфигурации, и по «сгусткам» локусов, близких по компонентным оценкам (эллипсы).

RED + HOL-контуры (convexhull) визуализировали площади разброса локусов в выборках. Облака точек-локусов двух выборок смешивались. Площадь контура HOL-выборки почти полностью покрывала такую же RED-выборки с некоторым сдвигом по PC1 в «+»-направлении (что соответствовало результатам табл. 2 и 4).

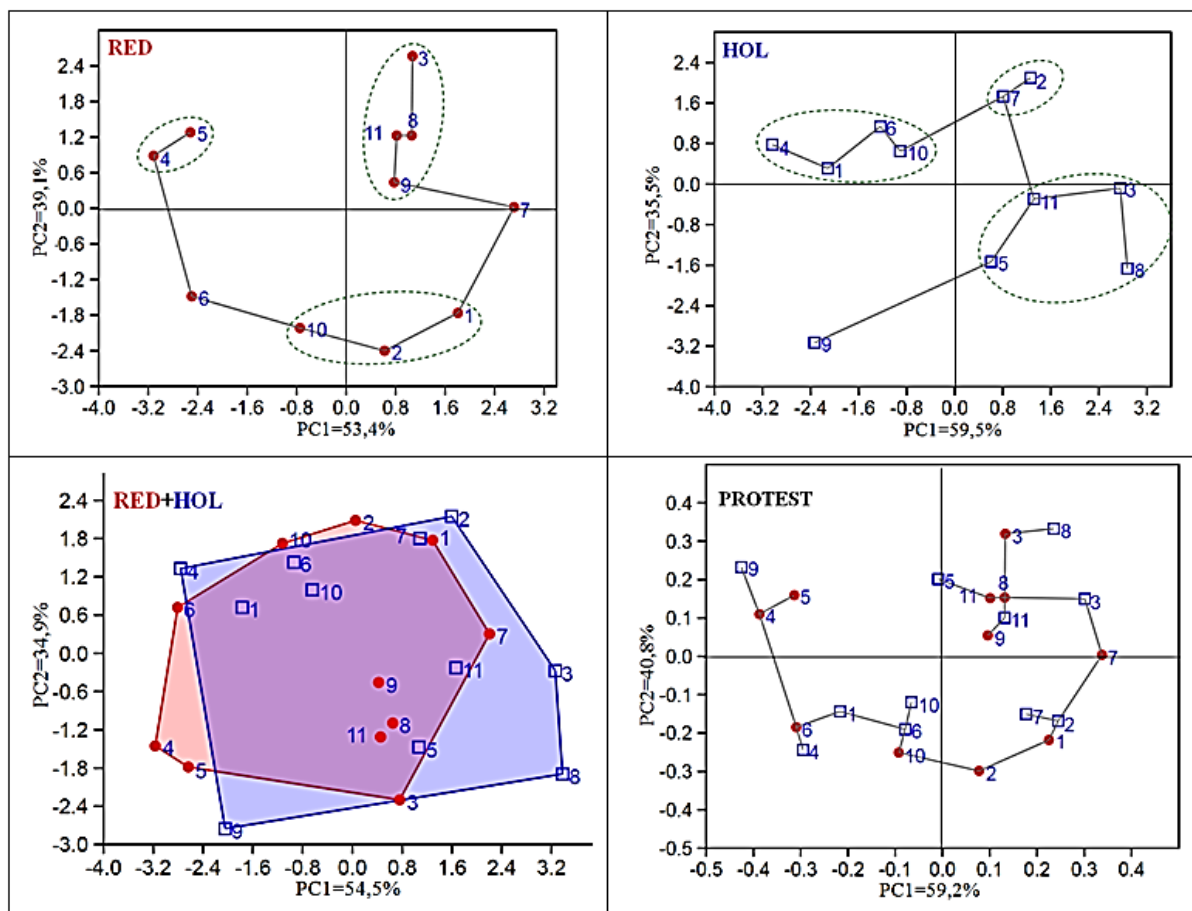


Рис. 4. Ординации локусов в RED и HOL выборках, RED+HOL – контуры выборок в объединённом анализе; PROTEST – ординация локусов после суперналожения /

Fig. 4. Ordinations of loci in RED and HOL samples, RED+HOL – sample contours in the united analysis; PROTEST – ordination of loci after superimposition

Для оценки различия/соответствия двух ординаций локусов использовали прокрустовый анализ (Procrustes analysis)¹⁷; RED-матрица была «референсной», а HOL-матрица – «ротационной». Ординации локусов двух выборок после «суперналожения» представлены

на рисунке 4 (PROTEST). Можно видеть «сгустки» локусов, близких по латентным переменным не только «своей» выборки, но и «чужой». Например, в верхней правой четверти локусы 3, 8 и 11 обеих выборок.

¹⁷Прокрустовый анализ сравнивает наборы многомерных форм, пытаясь преобразовать их в состояние суперналожения [20, 21]. В программе PROTEST это достигается путем минимизации сумм квадратов расстояний между соответствующими точками в каждой форме посредством перемещения, отражения, вращения и масштабирования их координатных матриц, что делает ординации сопоставимыми, помещая их в одну и ту же систему координат.

Суммы квадратов разностей между координатными точками одномерных локусов

Locus	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Невязка	0,20	0,05	0,06	0,13	0,09	0,05	0,05	0,04	0,30	0,02	0,00

Большие «невязки» имели место по локусам 1, 4, 5 и 9, максимальное соответствие – по локусам 10 и 11.

Программа PROTEST минимизировала суммарную «невязку» – m^2 (чем больше величина, тем меньше соответствие двух ординаций), рассчитала m_{12} -статистику (чем меньше величина, тем больше соответствие) и вероятность отвержения нулевой гипотезы (статистически значимое соответствие при $p_{perm} \leq 0,05$). Приблизительную степень соответствия двух ординаций (r_{Proc}^2) можно получить из отношения $m_{12}^2 = 1 - r_{Proc}^2$ [20], именно: $r_{Proc}^2 = 1 - m_{12}^2$. По программе PROTEST с 999 перестановками были получены следующие результаты: $m^2 = 0,994$, $m_{12} = 0,747$, $p_{perm} = 0,164$ ($r_{Proc}^2 = 0,253$, $r_{Proc} = 0,503$). Сопряжённость ординаций локусов RED- и HOL-выборок в пространстве координат двух главных компонент была статистически незначимой.

Двухблочный анализ частных наименьших квадратов (Two-Block Partial Least-Squares, 2B-PLS). Относительно новый 2B-PLS-метод¹⁸ подобен PCA, но для изучения структуры ковариации между двумя блоками многомерных данных, которые обрабатываются одновременно. Метод 2B-PLS даёт возможность выявить степень общности (ко-дисперсию) двух блоков данных. В основе 2B-PLS допущение, что наблюдения (исходные переменные) линейно связаны с небольшим числом латентных переменных (скрытых, непосредственно не наблюдаемых и не измеряемых, явлений, факторов, компонентов, как в PCA). 2B-PLS создаёт ортогональный набор латентных переменных (Latent Variables, LV), которые являются взвешенными линейными комбинациями исходных переменных¹⁹. Линейные комбинации формируются таким образом, чтобы новые интегрированные LV максимизировали квадрат ковариации между двумя многомерными блоками. Такие LV обеспечивают оценку всех возможных межблочных кова-

риаций и количественно определяют, как ассоциативный эффект выражен в анализируемых многомерных блоках.

Если имеется набор данных Y с двумя блоками Y_1 и Y_2 , с числом переменных p_1 и p_2 , то корреляционная(ковариационная) матрица R по Y_1 и Y_2 имеет структуру

$$R = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{21} & R_{22} \end{bmatrix},$$

где $R_{21} = R_{12}^t$ (R_{12}^t – транспонированная матрица) [28]. В 2B-PLS используется сингулярное разложение²⁰ кросс-корреляционной матрицы R_{12} для получения произведения $F_1 D F_2^t$. Матрица D – диагональная и содержит сингулярные числа (singular values) λ_i . Каждый столбец матрицы F_1 содержит веса/нагрузки для линейных комбинаций переменных блока 1, а каждый столбец F_2 – веса/нагрузки для переменных блока 2. Число строк соответствует числу переменных, p_1 и p_2 , в каждом блоке, а число столбцов (размерностей) равно меньшему значению из p_1 и p_2 . Первые k столбцов F_1 и F_2 интерпретируют как «дающие наилучшую аппроксимацию методом наименьших квадратов R_{21} -матрицы». Выражение $\sum \lambda_i^2$ равно сумме квадратов элементов в матрице R_{21} и является мерой общей ковариации между наборами переменных двух блоков. Учитывая, что максимально возможная величина $\sum \lambda_i^2$ равна $p_1 \times p_2$ (которая была бы получена, когда все корреляции равны 1), то отношение $\sum \lambda_i^2 / (p_1 p_2)$ является мерой общего квадрата ковариации («Squaredcovar») между двумя блоками (корреляции, если признаки были стандартизированы).

Результаты 2B-PLS-анализа сведены в таблице 8. Слева представлены сингулярные величины (λ_i) для семи размерностей ($axis$ – ось; их число равно числу переменных) и общий квадрат ковариации между RED- и HOL-выборками по семи переменным – $\sum \lambda_i^2 = 7,0296$.

¹⁸Был предложен Германом Оле Андреасом Вольдом (Herman Ole Andreas Wold) в 1975 году [26]. В современной интерпретации – Projection to Latent Structure (PLS) – проекция на латентную структуру.

¹⁹В 2B-PLS для блоков A и B с переменными A_i и B_j латентные переменные $LV_A = \sum_{i=1} \alpha_i A_i$ и $LV_B = \sum_{j=1} \beta_j B_j$, где α_i и β_j – веса: $\alpha_i \propto \sum_{j=1} r_{ij} \beta_j$ и $\beta_j \propto \sum_{i=1} \alpha_i r_{ij}$ (\propto – пропорционально; r_{ij} – корреляция), которые рассчитываются так, чтобы $\sum \alpha_i^2 = \sum \beta_j^2 = 1$ [27].

²⁰Сингулярное разложение (Singular Value Decomposition, SVD) – декомпозиция ковариационной матрицы с целью её приведения к каноническому виду, обеспечивающему сокращение вычислений, облегчение анализа и устойчивость всех матричных процедур.

Если бы между всеми переменными коэффициенты корреляции были равны 1, то общий квадрат ковариации был бы равен $7 \times 7 = 49$. Доля общего квадрата ковариации между данными RED и HOL, которая была максимизирована 2B-PLS-анализом, составила $Squared\ covar = 7,0296/49 = 0,143$, или 14,3 % относительно максимально возможного. Из них

0,83 ($= 2,4152^2/7,0296$), или 83 % приходилось на первую ось (столбец «% covar»), также являющейся первой латентной переменной (LV1), и 16,7 % – на вторую латентную переменную (LV2). В сумме LV1 и LV2 объясняли 99,7 % общей ковариации между двумя многомерными наборами данных.

Таблица 8 – Результаты 2B-PLS-анализа RED- и HOL-выборок /
Table 8 – Results of 2B-PLS analysis of RED and HOL samples

Axis	λ_i	% covar	Locus	RED: LV1	HOL: LV1	RED: LV2	HOL: LV2
1	2,4152	82,9790	1	0,3800	2,0561	-2,1895	0,6258
2	1,0822	16,6610	2	1,1945	-0,2361	-2,2852	-2,4530
3	0,1281	0,2335	3	-2,6466	-2,5204	0,8646	-0,9504
4	0,0930	0,1231	4	1,3671	3,0669	2,9019	0,7228
5	0,0145	0,0030	5	0,5451	-1,1794	2,5486	1,0593
6	0,0040	0,0002	6	2,5068	1,5928	0,5493	-0,4410
7	0,0014	0,0000	7	-1,4936	-0,0227	-1,6410	-1,9049
$\Sigma \lambda_i^2$	7,0296	100,0	8	-1,6958	-3,3268	-0,0866	0,3895
Squared covar = $\Sigma \lambda_i^2/p_1p_2 = 7,0296/(7 \times 7) = 0,1435$			9	-0,7005	0,8037	-0,1035	3,5525
			10	2,0891	1,0906	-0,6664	-0,2497
			11	-1,5460	-1,3248	0,1078	-0,3509
Linear correlation, r				0,717 ($p_{value} = 0,013$)		0,395 ($p_{value} = 0,229$)	

Примечания: λ_i = singular value – сингулярная величина; % covar = % covariation – % ковариации; LV – Latent Variable – латентная переменная; Squared covar (covariance) – квадрат ковариации /
Note: λ_i – singular value; % covar – % covariation; LV – Latent Variable; Squared covar – covariance

В таблице 8 справа даны координатные оценки (*scores*) локусов по LV1 и LV2 для RED- и HOL-выборок (RED:LV1 и RED:LV2, HOL:LV1 и HOL:LV2). В обеих выборках наибольшие нагрузки/веса в LV1 имели, в основном, показатели n_a , S_{ne} и H_e , характеризующие внутривыборочное α -разнообразие. Поэтому для LV1 также использовали акроним αLV (алатентная переменная). Для LV2 использовали акроним βLV , т. к. наибольшие нагрузки имели показатели G_{ST} , F'_{ST} , D_J и D'_{β} , характеризующие межсубвыборочное β -разнообразие.

По αLV линейная связь (r) между RED- и HOL-матрицами/блоками оценивалась в 0,717 при $p_{value} = 0,013$ с 95 % CI [0,21, 0,92]. Информационный показатель общности (ко-дисперсия) составил $r^2 = 0,515$, или 51,5 %. По βLV корреляция между матрицами была статистически незначимой (0,395, $p_{value} = 0,229$). Усреднённая оценка составила $\bar{r} = 0,56$ ($p_{value} = 0,025^{21}$), что дало показатель общности $\bar{r}^2 = 31,4$ %.

Схожие результаты были получены, когда векторы координатных оценок локусов

по αLV и βLV были объединены в пределах выборок: $LV_{RED} = \alpha LV_{RED} U \beta LV_{RED}$ и $LV_{HOL} = \alpha LV_{HOL} U \beta LV_{HOL}$, где U – символ объединения. Между LV_{RED} и LV_{HOL} коэффициент конгруэнтности (согласованности) составил $r_c = 0,57$ ($p_{value} = 0,0056, 95\% \text{ CI } [0,19, 0,80]$), показатель общности выборок $r_c^2 = 32,5$ %. Кроме того, для каждой выборки по k -ому локусу был рассчитан «комплексный» латентный признак: $\gamma LV_{RED(k)} = \alpha LV_{RED(k)} + \beta LV_{RED(k)}$ и $\gamma LV_{HOL(k)} = \alpha LV_{HOL(k)} + \beta LV_{HOL(k)}$. Линейная корреляция между γLV_{RED} и γLV_{HOL} была 0,5 ($p_{value} = 0,114$), показатель общности – 25 %.

На рисунке 5 в верхнем ряду слева представлен разброс локусов в плоскости координат RED- и HOL-выборок по αLV . Облако точек-локусов и линия регрессии говорят о положительной корреляции. Коэффициент детерминации регрессии (R^2), равный 51,5 %, также является информационным показателем общности двух наборов многомерных данных. Справа – результаты кластеринга – дендрограмма (дерево классификации) по алгоритму

²¹Комбинированная статистическая значимость была рассчитана по методу Фишера [29].

невзвешенного парно-группового метода с арифметическим усреднением (Unweighted Pair-Group Method using arithmetic Averages – UPGMA). Кофенетическая корреляция, равная 0,664, показатель того, насколько хорошо характер отношений (сходство/несходство) между локусами представлялось дендрограммой²². В точках ветвления даны бутстрэп-

вероятности объединения локусов в кластеры, близких по αLV . С учётом этих вероятностей на ординации слева овалами выделена возможная группировка локусов – структура ковариации двух многомерных наборов данных (пунктир – бутстрэп-вероятность $\cong 50\%$, тонкая линия – $\cong 75\%$, жирная линия – 100%).

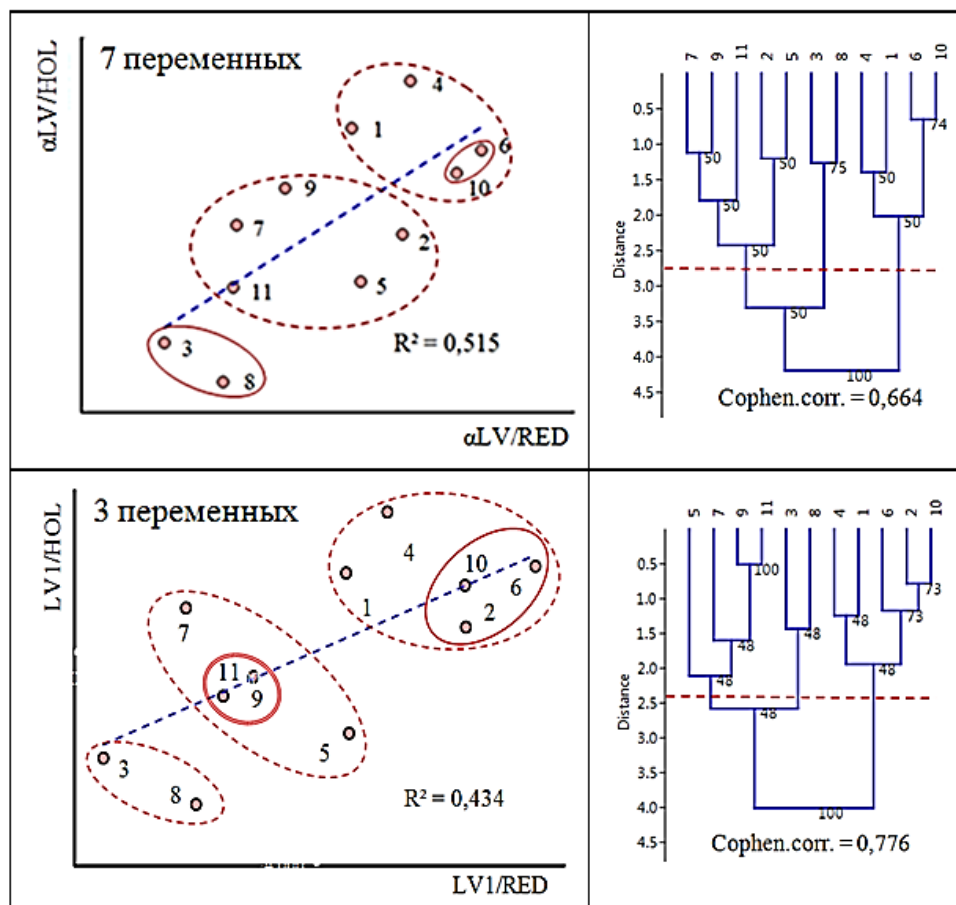


Рис. 5. Структуры ковариации локусов RED- и HOL-выборок (слева) и UPGMA дендрограммы (справа) по αLV (полные данные) и LV1 (редуцированные данные) /

Fig. 5. Covariance structures of the loci in the samples RED and HOL (left) and UPGMA dendrograms (right) by to αLV (complete data) and LV1 (reduced data)

Выше отмечалось, что в βLV наибольшие нагрузки (веса) имели показатели β -разнообразия. Линейная связь двух выборок по βLV была статистически незначимой, что, как представляется, и следовало ожидать между показателями дифференциации субвыборок в RED- и HOL-выборках. Исходя из этого и учитывая небольшой вклад βLV в максимально возможную ковариацию (16,7 %), был проведён

2B-PLS-анализ по *редуцированным* данным – трём переменным α -разнообразия (n_a , s_n и H_e).

Максимальный квадрат ковариации (Squaredcovar) составил 0,393. При этом 99,9 % приходилось на первую латентную переменную (LV1). Линейная связь по LV1 между RED- и HOL-выборками оценивалась в 0,659 при $p_{value} = 0,0253$ с 95 % CI [0,097; 0,902]. Показатель ко-дисперсии (R^2) был 43,4 %.

²²Кофенетическая корреляция вычисляется как линейный коэффициент корреляции Пирсона (или ранговый коэффициент Спирмена) между всеми расстояниями, полученными по дереву иерархии, и элементами исходной матрицы дистанций.

Результаты 2B-PLS анализа и кластеринга представлены на рисунке 5 в нижнем ряду. Ординации и структуры ковариации локусов в пространстве координат RED- и HOL-выборок по полному (αLV) и редуцированному ($LV1$) наборам данных имели хорошее соответствие (прокрустов тест: $m_{12} = 0,0728$, $p_{perm} = 0,001$, $r_{Proc}^2 = 0,927$).

Расширение. Подход к рассмотрению полокусных оценок показателей разнообразия (профилей локусов) выборки, как матрицы многомерного набора данных с последующей нормализацией и обработкой многомерными методами статистики, был применён для выяв-

ления индекса дифференциации и ординации пород. В частности, были использованы данные из публикации чешских учёных [30], в которой обсуждались результаты анализа генетического разнообразия по 11 STR-локусам семи пород крупного рогатого скота Центральной Европы. В таблице 9 воспроизведена описательная статистика разнообразия (Descriptive Diversity Statistics, **DDS**) по породам.

Для оценки дифференциации пород авторы использовали несколько мер, одна из которых была D_S – стандартная дистанция Нея (табл. 10 над диагональю).

Таблица 9 – Описательная статистика разнообразия по породам молочного скота Центральной Европы [30] /
Table 9 – Descriptive statistics of diversity by breeds of dairy cattle in Central Europe [30]

Breed	Code	n_a	H_o	H_e	PIC
Czech Pied	CP	7,90	0,779	0,764	0,757
Slovakian Pied	SP	7,45	0,654	0,650	0,642
Slova Pinzgau	SPg	9,00	0,759	0,751	0,745
Holstein	HO	5,82	0,806	0,697	0,685
Polish Red	PR	8,45	0,748	0,747	0,741
German Red	GR	7,00	0,675	0,716	0,711
Czech Red	CR	7,18	0,789	0,751	0,749

Примечания: H_o – фактическая гетерозиготность; PIC – информационный контент полиморфизма /
Notes: H_o – observed heterozygosity; PIC – polymorphism information content.

Таблица 10 – Треугольные матрицы парных дистанций между породами (над диагональю – D_S [30],
под диагональю – D_{Euclid}) /
Table 10 – Triangular matrices of paired distances between breeds (above the diagonal – D_S [30], below the
diagonal – D_{Euclid})

Breed	CP	SP	SPg	HO	PR	GR	CR
CP		0,102	0,181	0,374	0,198	0,208	0,171
SP	0,429		0,326	0,577	0,319	0,294	0,298
SPg	0,162	0,412		0,267	0,190	0,280	0,182
HO	0,375	0,329	0,466		0,332	0,420	0,332
PR	0,114	0,364	0,076	0,398		0,163	0,091
GR	0,267	0,211	0,316	0,243	0,246		0,151
CR	0,127	0,365	0,246	0,252	0,178	0,193	

Усреднённая D_S -дистанция составила 0,260 с 95 % CI [0,207; 0,312]. Рассчитанная нами по масштабированным DDS-данным треугольная матрица парных евклидовых дистанций (табл. 10 под диагональю) имела среднее 0,275 с 95 % CI [0,224; 0,325]!

По каждой треугольной матрице был сделан PCA. Информативность PCA/ D_S по трём главным компонентам составила $46,5 + 32,0 + 14,7 = 93,2$ %, по PCA/ D_{Euclid} – $61,2 + 20,3 + 13,3 = 94,8$ %. Прокрустов тест на соответствие структур 3D-ординаций пород

(по D_S и D_{Euclid}) дал статистики: $m_{12} = 0,387$, $p_{perm} = 0,054$ (доверительная вероятность 94,6 %), $r_{Proc}^2 = 0,613$ ($r_{Proc} = 0,783$).

Также были использованы данные из работы [31] с результатами анализа полиморфизма 10 STR-локусов и информацией о состоянии генетического разнообразия и структуре 11 пород свиней. По каждой породе DDS-данные включали пять показателей: среднее и эффективное число аллелей на локус, аллельное разнообразие, наблюдаемую и ожидаемую гетерозиготности. По масштаби-

рованным DDS-данным мы рассчитали парные D_{Euclid} между породами. Усреднённая дистанция составила 0,376 с 95 % CI [0,327; 0,425].

Авторы в работе дали треугольную матрицу парных генетических F_{ST} -дистанций. Их усреднённое значение было 0,139 (95 % CI [0,126; 0,152]), что в 2,7 раза ниже средней D_{Euclid} по DDS-данным. Однако было показано [32, 12], что F_{ST} -мера занижает оценки, рассчитанные по полиморфным локусам. После корректировки парных F_{ST} по [33] усреднённая оценка составила 0,358 и была достаточно близка к величине усреднённых парных D_{Euclid} (0,376).

Как и в первом случае, были получены PCA-ординации пород. Информативность PCA/ F_{ST} по трём главным компонентам составила $43,5 + 23,7 + 13 = 80,2$ %, по PCA/ D_{Euclid} – $53,1 + 35,8 + 4,1 = 93$ %. Прокрустов тест на сходство 3D-ординаций пород дал статистики: $m_{12} = 0,489$, $p_{perm} = 0,004$ (высокозначимое соответствие), $r_{Proc}^2 = 0,511$ ($r_{Proc} = 0,715$). Таким образом, оба примера демонстрировали неплохое согласие результатов, полученных по DDS-данным, с «референсными» результатами по «традиционным» методам.

Закключение. Анализ масштабированных оценок трёх показателей α (n_a , s_{n_e} и H_e) и четырёх показателей β ($G'_{ST(N)}$, G''_{ST} , D_{est} , D') разнообразия (y'_{km}) по каждому из 11 STR-локусов двух [подразделённых] выборок производителей красной скандинавской (RED, $n = 29$) и голштинской (HOL, $n = 45$) пород показал следующие результаты.

При относительно равных остаточных вариансах y'_{km} межлокусная вариация в HOL-выборке была на 37,7 % больше, чем в RED-выборке. Гомогенность (надёжность) индивидуальных оценок была ~50 %, усреднённых по профилям локусов ~86 %.

По ANOVA фиксированного типа статистически значимое влияние на изменчивость y'_{km} имели факторы «порода» – 2 %, «локус» – 36,7 % и их взаимодействие – 15,6 % ($p_{value} < 0,02$). По модели смешанного типа статистически значимым было влияние только взаимодействия «порода×локус» – 25,8 % ($p_{value} < 0,0001$). Порода производителей влияла на отношение между локусами и оценками показателей генетического разнообразия.

Рассчитанная из корреляции Кендалла ($\tau = 0,382$) вероятность совпадения порядков [по усреднённым оценкам] наугад выбранной пары локусов из RED- и HOL-выборок оценивалась в 69 %, несовпадения – 31 %. Последнее значение и эффект взаимодействия «порода×локус», равный 25,8 %, можно интерпрети-

ровать как показатели относительного различия породных выборок.

Расстояния между профилями локусов (евклидовы дистанции) в RED-выборке слабо коррелировали с аналогичными расстояниями в выборке HOL ($R_M = 0,257$, $p_{value} = 0,056$). Усреднённая дистанция между профилями локусов в HOL-выборке составила 63,4 % и была на 15,2 процентных пункта больше, чем в RED-выборке ($p_{value} = 0,0057$). Усреднённая дистанция между выборками по одноимённым локусам была 37,8 % с 95 % CI [27,9; 57,5], по редуцированной выборке (только переменные α -разнообразия) – 34,1 % с 95 % CI [20,4; 47,8]. Величины двух последних средних были близки к оценкам генетической дифференциации пород, рассчитанным по частотам аллелей (29–37 %) [14].

При PCA-анализе профилей локусов RED-выборки два первых главных компонента объясняли 92,5 % общей дисперсии y'_{km} , в HOL-выборке – 95 %. Соответствие 2D-ординаций локусов двух выборок было слабым, их конфигурации и структуры существенно отличались (прокрустов тест: $m_{12} = 0,75$, $p_{perm} = 0,164$, $r_{Proc}^2 = 0,25$).

При 2B-PLS-анализе 83 % от максимально возможной ковариации между многомерными данными RED- и HOL-выборок объяснялось первой интегрированной латентной переменной (αLV) и 16,7 % – второй (βLV). По αLV линейная связь между блоками данных оценивалась в 0,717 ($p_{value} = 0,013$), показатель общности выборок составил 51,4 %. По βLV корреляция была статистически незначимой (0,395, $p_{value} = 0,233$). Усреднённая по αLV и βLV оценка корреляции составила 0,56 ($p_{value} = 0,025$), что дало показатель общности 31,4 %. Анализ по редуцированным данным (только переменные α -разнообразия) показал, что 99,9 % возможной ковариации приходилось на первую LV ($LV1$). Линейная связь по $LV1$ между RED и HOL выборками составила 0,659 ($p_{value} = 0,0253$), показатель общности – 43,4 %. По полному (αLV) и редуцированному ($LV1$) наборам данных имело место хорошее соответствие ординаций локусов в пространстве координат двух выборок (прокрустов тест: $m_{12} = 0,0728$, $p_{perm} = 0,001$, $r_{Proc}^2 = 0,927$). В структуре межвыборочной ковариации выделялись кластеры локусов с бутстрэп-вероятностью [группировки] 50, 75 и 100 %. Можно предположить, что RED- и HOL-выборки имели некоторую согласованность (конгруэнтность) по показателям α -разнообразия одноимённых локусов.

Применение «многомерного» подхода к опубликованным в литературе данным описательной статистики разнообразия *пород* показало достаточно высокое соответствие оценок показателей дифференциации и результатов РСА с таковыми, полученными на базе «традиционных» (частотных) методов. Так, прокрустовая корреляция между «многомерной» и «традиционной» структурами семи пород крупного рогатого скота составила 0,783 ($p_{perm} = 0,054$), 11 пород свиней – 0,715 ($p_{perm} = 0,004$).

Итак, анализ полокусных оценок показателей генетического разнообразия, с одной стороны, способствовал извлечению из многомерных наборов данных дополнительной информации (влияние факторов на изменчивость оценок, дистанции между локусами в пределах и между выборками, визуализация

структурной организации локусов, различие и общность выборок), с другой стороны, не противоречил результатам, полученными «традиционными» методами (генетическая дифференциация выборок). Дополнительная информация может использоваться в разведочном анализе генетических данных (для ориентации в первом приближении), при разработке мероприятий по сохранению генофондных стад, в мета-анализе генетической структуры пород по описательной статистике разнообразия, имеющейся, как правило, в многочисленных публикациях. В общем, как представляется, рассмотренные в статье подходы и методы расширяют возможности популяционно-генетических [и селекционно-зоотехнических] исследований, в которых многомерные наборы данных являются нормой, а не исключением.

References

1. Кузнецов В. М. Анализ полокусных оценок аллельного разнообразия STR-маркеров в выборке быков-производителей. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2023;24(5):888–906. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.5.888-906> EDN: LCTSP
2. Kuznetsov V. M. Analysis of locus estimates of allelic diversity of STR markers in a sample of breeding bulls. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka = Agricultural Science Euro-North-East*. 2023;24(5):888–906. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.5.888-906>
3. Хедрик Ф. Генетика популяций. М.: Техносфера, 2003. 592 с. Khedrik F. Population genetics. Moscow: *Tekhnosfera*, 2003. 592 p.
4. Nei M. Analysis of gene diversity in subdivided populations. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 1973;70(12):3321–3323. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.70.12.3321>
5. Weir B. S., Cockerham C. C. Estimating F-statistics for the analysis of population structure. *Evolution*. 1984;38(6):1358–1370. DOI: <https://doi.org/10.2307/2408641>
6. Meirmans P. G., Hedrick P. W. Assessing population structure: F_{ST} and related measures. *Molecular Ecology Resources*. 2011;11(1):5–18. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1755-0998.2010.02927.x>
7. Jost L. G_{ST} and its relatives do not measure differentiation. *Molecular Ecology*. 2008;17(18):4015–4026. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-294X.2008.03887.x>
8. Shannon C. E. A mathematical theory of communication. reprinted with corrections from. *The Bell System Technical Journal*. 1948;27(3):379–423, 623–656. URL: <https://people.math.harvard.edu/~ctm/home/text/others/shannon/entropy/entropy.pdf>
9. Sherwin W. B. Entropy and information approaches to genetic diversity and its expression: Genomic geography. *Entropy*. 2010;12(7):1765–1798. DOI: <https://doi.org/10.3390/e12071765>
10. Кузнецов В. М. F-статистики Райта: оценка и интерпретация. *Проблемы биологии продуктивных животных*. 2014;(4):80–104. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22833217> EDN: TFRDMN
11. Kuznetsov V. M. Wright's F-statistics: estimation and interpretation. *Problemy biologii produktivnykh zhivotnykh = Problems of Productive Animal Biology*. 2014;(4):80–104. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22833217>
12. Кузнецов В. М. Методы Нея для анализа генетических различий между популяциями. *Проблемы биологии продуктивных животных*. 2020;(1):91–110. DOI: <https://doi.org/10.25687/1996-6733.prodanimbiol.2020.1.91-110> EDN: DSEMYO
13. Kuznetsov V. M. Nei's methods for analyzing genetic differences between populations. *Problemy biologii produktivnykh zhivotnykh = Problems of Productive Animal Biology*. 2020;(1):91–110. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.25687/1996-6733.prodanimbiol.2020.1.91-110>
14. Кузнецов В. М. Сравнение методов оценки генетической дифференциации популяций по микросателлитным маркерам. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2020;21(2):169–182. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2020.21.2.169-182> EDN: FYQNT
15. Kuznetsov V. M. Comparison of methods for evaluating genetic differentiation of populations by microsatellite markers. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka = Agricultural Science Euro-North-East*. 2020;21(2):169–182. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2020.21.2.169-182>
16. Кузнецов В. М. Оценка генетической дифференциации популяций молекулярным дисперсионным анализом. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2021;22(2):167–187. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2021.22.2.167-187> EDN: LGYMFT
17. Kuznetsov V. M. Assessment of genetic differentiation of populations by analysis of molecular variance (analytical review). *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka = Agricultural Science Euro-North-East*. 2021;22(2):167–187. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2021.22.2.167-187>

14. Кузнецов В. М. Информационно-энтропийный подход к анализу генетического разнообразия популяций. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2022;23(2):159–173. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2022.23.2.159-173> EDN: LSSUYZ
Kuznetsov V. M. Information-entropy approach to the analysis of genetic diversity of populations (analytical review). *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = *Agricultural Science Euro-North-East*. 2022;23(2):159–173. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2022.23.2.159-173>
15. Peakall R., Smouse P. E. GENALEX 6: genetic analysis in Excel. Population genetic software for teaching and research. *Molecular Ecology Notes*. 2006;6(1):288–295. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1471-8286.2005.01155.x>
16. Peakall R., Smouse P. E. GenAlEx 6.5: Genetic analysis in Excel. Population genetic software for teaching and research – an update. *Bioinformatics*. 2012;28(19):2537–2539. DOI: <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/bts460>
17. Smouse P. E., Whitehead M., Peakall R. An informational diversity framework, illustrated with sexually deceptive orchids in early stages of speciation. *Molecular Ecology Resources*. 2015;15(6):1375–1384. DOI: <https://doi.org/10.1111/1755-0998.12422>
18. Hammer Ø., Harper D. A. T., Ryan P. D. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica*. 2001;4(1):1–9. URL: https://palaeo-electronica.org/2001_1/past/past.pdf
19. Camúñez L. E. M., Roca C. F., Tornero R. Guía de KyPlot: Programa de análisis de datos en contexto científico. *Facultat de Física- Universitat de València (UVEG)*. 2008. 33 p.
20. Peres-Neto P. R., Jackson D. A. How well do multivariate data sets match? The advantages of a Procrustean superimposition approach over the Mantel test. *Oecologia*. 2001;129(2):169–178. DOI: <https://doi.org/10.1007/s004420100720>
21. Dray S., Chessel D., Thioulouse J. Procrustean co-inertia analysis for the linking of multivariate datasets. *Écoscience*. 2003;10(1):110–119. DOI: <https://doi.org/10.1080/11956860.2003.11682757>
22. McGraw K. O., Wong S. P. Forming inferences about some intraclass correlation coefficients. *Psychological Methods*. 1996;1(1):30–46. DOI: <https://doi.org/10.1037/1082-989X.1.1.30>
23. Koo T. K., Li M. Y. A guideline of selecting and reporting intraclass correlation coefficients for reliability research. *Journal of Chiropractic Medicine*. 2016;15(2):155–163. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcm.2016.02.012>
24. Шеффе Г. Дисперсионный анализ. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1980. 512 с. Режим доступа: <https://studizba.com/files/show/djvu/3369-1-sheffe-g--dispersionnyy-analiz.html>
- Sheffe G. Analysis of variance. Moscow: *Nauka. Glavnaya re-daktsiya fiziko-matematicheskoy literatury*, 1980. 512 p. URL: <https://studizba.com/files/show/djvu/3369-1-sheffe-g--dispersionnyy-analiz.html>
25. Гласс Дж., Стэнли Дж. Статистические методы в педагогике. Пер. с англ. Л. И. Хайрусовой, общ. ред. Ю. П. Адлера. Послесл. Ю. П. Адлера и А. Н. Ковалева. М.: изд-во «Прогресс», 1976. 495 с.
- Glass Dzh., Stenli Dzh. Statistical methods in pedagogy. *Per. s angl. L. I. Khayrusovoy, obshch. red. Yu. P. Adlera. Poslesl. Yu. P. Adlera i A. N. Kovaleva*. Moscow: *izd-vo «Progress»*, 1976. 495 p.
26. VanRoon P., Zakizadeh J., Chartier S. Partial least squares tutorial for analyzing neuroimaging data. *The Quantitative Methods for Psychology*. 2014;10(2):200–215. DOI: <https://doi.org/10.20982/tqmp.10.2.p200>
27. Sampson P. D., Streissguth A. P., Barr H. M., Bookstein F. L. Neurobehavioral effects of prenatal alcohol: Part II. Partial least squares analysis. *Neurotoxicology and Teratology*. 1989;11(5):477–491. DOI: [https://doi.org/10.1016/0892-0362\(89\)90025-1](https://doi.org/10.1016/0892-0362(89)90025-1)
28. Rohlf F. J., Corti M. Use of two-block partial least-squares to study covariation in shape. *Systematic Biology*. 2000;49(4):740–753. DOI: <https://doi.org/10.1080/106351500750049806>
29. Fisher R. A. Combining independent tests of significance. *American Statistician*. 1948;2(5):30. DOI: <https://digital.library.adelaide.edu.au/dspace/bitstream/2440/15258/1/224A.pdf>
30. Czerneková V., Kott T., Dudková G., Sztankóová Z., Soldát J. Genetic diversity between seven Central European cattle breeds as revealed by microsatellite analysis. *Czech Journal of Animal Science*. 2006;51(1):1–7. DOI: <https://doi.org/10.17221/3902-CJAS>
31. Харзинова В. Р., Зиновьева Н. А. Паттерн генетического разнообразия у локальных и коммерческих пород свиней на основе анализа микросателлитов. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2020;24(7):747–754. DOI: <https://doi.org/10.18699/VJ20.669> EDN: BJRYAW
- Kharzinova V. R., Zinovieva N. A. The pattern of genetic diversity of different breeds of pigs based on microsatellite analysis. *Vavilovskiy zhurnal genetiki i selektsii*. = *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2020;24(7):747–754. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18699/VJ20.669>
32. Hedrick P. W. Perspective: Highly variable loci and their interpretation in evolution and conservation. *Evolution*. 1999;53(2):313–318. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1558-5646.1999.tb03767.x>
33. Hedrick P. W. A standardized genetic differentiation measure. *Evolution*. 2005;59(8):1633–1638. URL: <https://www.jstor.org/stable/3449070>

Сведения об авторе

✉ Кузнецов Василий Михайлович, доктор с.-х. наук, профессор, зав. лабораторией популяционной генетики в животноводстве, ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого», ул. Ленина, д. 166а, г. Киров, Российская Федерация, 610007, e-mail: priemnaya@fanc-sv.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2219-805X>, e-mail: vm-kuznetsov@mail.ru

Information about the author

✉ Vasily M. Kuznetsov, DSc in Agricultural Science, professor, Head of the Laboratory of Population Genetics in Animal Husbandry, Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky, Lenin str., 166a, Kirov, Russian Federation, 610007, e-mail: priemnaya@fanc-sv.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2219-805X>, e-mail: vm-kuznetsov@mail.ru

✉ – Для контактов / Corresponding author

МЕХАНИЗАЦИЯ, ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ, АВТОМАТИЗАЦИЯ / MECHANIZATION, ELECTRIFICATION, AUTOMATION

<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.3.483-494>

УДК 631.171



Оценка производительности беспилотных машинно-тракторных агрегатов

© 2024. И. А. Старостин✉, С. А. Давыдова, А. В. Ещин, Т. З. Годжаев
ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», г. Москва,
Российская Федерация

Достижению поставленной перед агропромышленным комплексом цели по переходу к высокопродуктивному, экологически чистому агрохозяйству способствует внедрение передовых цифровых, интеллектуальных производственных технологий и роботизированных систем. Учитывая это, а также мировые тенденции развития беспилотных мобильных средств, предложены три концептуальные модели развития беспилотных мобильных энергетических средств: создание универсальных беспилотных мобильных средств различных тяговых классов и мощности на базе серийно выпускающихся тракторов (концептуальная модель А), создание работающих группами универсальных беспилотных мобильных средств малой мощности (концептуальная модель В) и создание энергомодулей (концептуальная модель С). С целью определения дальнейших перспектив их использования осуществлены теоретические изыскания по вопросу оценки производительности сельскохозяйственных агрегатов в составе с беспилотными мобильными средствами предложенных концептуальных моделей. Исследования проводили на основе существующих общеизвестных методик и формул определения производительности. Проведенный анализ влияющих на производительность сельскохозяйственного агрегата при выполнении полевых операций факторов показывает, что при применении беспилотных мобильных средств может быть обеспечен рост производительности агрегата за счет увеличения коэффициента использования ширины захвата и времени основной работы за счет исключения затрат времени на отдых и личные нужды оператора, сокращения затрат времени при разворотах агрегата в конце гона. Разработанные методологические подходы к вопросу расчета производительности сельскохозяйственных агрегатов в составе с беспилотными мобильными средствами сельскохозяйственного назначения позволили оценить рост производительности агрегатов при использовании беспилотных мобильных средств предлагаемых концептуальных моделей. Применение беспилотных мобильных средств рассматриваемых концептуальных моделей может позволить повысить сменную производительность агрегатов для сплошной культивации по сравнению с традиционными пилотируемыми тракторами на уровень от 3 до 24 %.

Ключевые слова: цифровое сельское хозяйство, цифровые технологии, концепция, трактор, сельскохозяйственный агрегат, мобильное энергетическое средство, производительность сельскохозяйственного агрегата

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (тема № FGUN-2022-0002).

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Старостин И. А., Давыдова С. А., Ещин А. В., Годжаев Т. З. Оценка производительности беспилотных машинно-тракторных агрегатов. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2024;25(3):483–494.

DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.3.483-494>

Поступила: 26.02.2024

Принята к публикации: 31.05.2024

Опубликована онлайн: 26.06.2024

Performance evaluation of unmanned machine-tractor units

© 2024. Ivan A. Starostin✉, Svetlana A. Davydova, Aleksandr V. Eshchin,
Teimur Z. Godzhaev

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

The implementation of advanced digital, intelligent production technologies and robotic systems contributes to the achievement of the goal set for the agro-industrial complex for transition to a highly productive, environmentally friendly agricultural economy. Taking this into account, as well as the global trends in the development of unmanned mobile vehicles, three conceptual models for the development of unmanned mobile power tools are proposed: the creation of universal unmanned mobile vehicles of various traction classes and power based on commercially available tractors (conceptual model A), the creation of universal unmanned low-power mobile devices working in groups (conceptual model B) and the creation of energy modules (conceptual model C). In order to determine further prospects for their use, theoretical studies have been carried out

on the issue of evaluating the productivity of agricultural aggregates in combination with unmanned mobile vehicles of the proposed conceptual models. The research was carried out on the basis of existing well-known methods and formulas for determining productivity. The analysis of factors affecting the productivity of an agricultural unit during field operations shows that when using unmanned mobile vehicles, an increase in the productivity of the unit can be ensured by increasing the utilization factor of the width of the grip and the time of main work by eliminating the time spent on rest and personal needs of the operator, reducing the time spent when turning the unit at the end of the rut. The developed methodological approaches to the issue of calculating the productivity of agricultural aggregates in combination with unmanned mobile agricultural vehicles made it possible to assess the increase in the productivity of aggregates using unmanned mobile means of the proposed conceptual models. The use of unmanned mobile vehicles of the considered conceptual models can increase the replaceable productivity of units for continuous cultivation compared with traditional manned tractors by a level from 3 to 24 %.

Keywords: digital agriculture, digital technologies, concept, tractor, agricultural unit, mobile energy facility, agricultural unit productivity

Acknowledgments: this work was supported by 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-2022-0002).

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

Conflict of interest: the authors declare that there is no conflict of interest.

For citation: Starostin I. A., Davydova S. A., Eshchin A. V., Godzhaev T. Z. Performance evaluation of unmanned machine-tractor units. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2024;25(3):483-494. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.3.483-494>

Received: 26.02.2024

Accepted for publication: 31.05.2024 Published online: 26.05.2024

Одним из приоритетных направлений научно-технологического развития сельского хозяйства является переход к высокопродуктивному, экологически чистому агрохозяйству. Достижению поставленной цели способствует внедрение передовых цифровых, интеллектуальных производственных технологий и роботизированных систем в АПК [1].

Учитывая мировые тенденции развития беспилотных мобильных средств [2], а также активное внедрение в сельскохозяйственное производство цифровых, информационных, интеллектуальных технологий [1, 3, 4] и роботизированных комплексов [5, 6, 7, 8] предлагается рассмотреть три концептуальные модели развития средств механизации сельского хозяйства:

- создание универсальных беспилотных мобильных средств различных тяговых классов и мощности на базе серийно выпускающихся тракторов (концептуальная модель А);

- создание универсальных беспилотных мобильных средств малой мощности, которые за счет их групповой работы (рой) [9] будут способны заменить всю номенклатуру применяющихся тракторов различных тяговых классов и мощности (концептуальная модель В);

- создание энергомодулей [10] (концептуальная модель С).

При реализации концептуальной модели А за базу принимаются серийно выпускающиеся сельскохозяйственные тракторы тяговых классов

от 0,6 до 8 в соответствии с ГОСТ 27021-86 (СТ СЭВ 628-85)¹, которые подвергаются соответствующей модернизации. При реализации концептуальной модели В за базу принимается мобильное энергетическое средство тягового класса 0,6, а при реализации концептуальной модели С базой является энергомодуль, соответствующий по своим тяговым характеристикам тракторам тягового класса 0,2.

Предполагается, что предложенные концептуальные модели беспилотных мобильных средств оснащаются комплексом систем, обеспечивающих возможность реализации полностью беспилотного управления. К данным системам относятся – системы беспилотного вождения с точностью до 0,02 м (достигается современными системами вождения); система управления трансмиссией с поддержанием оптимальной скорости при работе в загонке и на поворотах; система управления гидравлической системой мобильного энергетического средства с автоматическим подъемом рабочих органов сельскохозяйственного агрегата на разворотной полосе и их опусканием после осуществления разворота; система управления ВОМ мобильного энергетического средства; система управления настройками сельскохозяйственной машины (при их наличии); система мониторинга технического состояния узлов и агрегатов мобильного энергетического средства и сельскохозяйственной машины.

¹ГОСТ 27021-86 (СТ СЭВ 628-85). Тракторы сельскохозяйственные и лесохозяйственные. Тяговые классы. М.: изд-во стандартов, 1986. 8 с. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294827/4294827535.pdf>

В настоящее время учеными и ведущими производителями сельскохозяйственной техники в равной степени прорабатываются все описанные концепции. Для определения дальнейших перспектив требуется проработать вопрос оценки эффективности применения предложенных концептуальных моделей беспилотных мобильных средств сельскохозяйственного назначения.

При комплектовании машинно-тракторного парка организации выбор мобильных энергетических средств для выполнения технологических операций осуществляется по двум основным подходам. Первый подход предусматривает использование мобильных энергетических средств, позволяющих за счет своей высокой производительности осуществлять технологические операции в сжатые сроки наиболее напряженного периода. Второй подход предусматривает использование мобильных энергетических средств, позволяющих минимизировать затраты на выполнение всего комплекса работ [11].

Произведенный анализ литературных источников показывает, что применение беспилотных мобильных средств позволяет существенно повысить производительность и качество проведения работ [7, 12], исключить тяжелый ручной труд и участие человека в выполнении вредных для здоровья технологических операций [8, 11, 13]. При этом в большинстве случаев вызывает вопросы экономическая эффективность применения данной техники [5, 6, 8], в связи с чем при оценке экономических показателей необходим комплексный подход, учитывающий, в частности, влияние применения современных технологий на производительность. Существующие подходы к расчету производительности машинно-тракторных агрегатов не учитывают эффекта от использования современных систем цифрового управления, позволяющих в дальнейшем создавать беспилотные мобильные средства. В связи с этим возникают затруднения при теоретической оценке эффекта от применения разрабатываемой техники, в частности при сравнительной оценке производительности машинно-тракторных агрегатов в составе с перспективными беспилот-

ными мобильными средствами и существующими пилотируемыми тракторами.

Цель исследований – разработка методологических подходов к оценке производительности сельскохозяйственных агрегатов в составе с беспилотными мобильными средствами различных концептуальных моделей путем выявления влияния на производительность их компоновочных схем и применения цифровых систем управления агрегатом.

Задачи исследования:

- анализ методологических подходов к оценке производительности сельскохозяйственных агрегатов;
- выявление факторов, оказывающих влияние на производительность сельскохозяйственных агрегатов;
- разработка методологических подходов к оценке производительности сельскохозяйственных агрегатов в составе с беспилотными мобильными энергетическими средствами;
- проведение сравнительной оценки производительности сельскохозяйственных агрегатов в составе с предлагаемыми концептуальными моделями беспилотных мобильных энергетических средств в сравнении с использованием традиционных пилотируемых тракторов.

Научная новизна – разработка методологических подходов к оценке производительности сельскохозяйственных агрегатов в составе с беспилотными мобильными средствами предложенных концептуальных моделей при выполнении полевых работ.

Материал и методы. При проведении исследований применяли существующие общеизвестные методики определения производительности сельскохозяйственного агрегата^{2, 3, 4} [14, 15, 16], а также данные об эффективности использования систем параллельного вождения [13]. Сравнительную оценку производили для однотипных сельскохозяйственных агрегатов с классическими мобильными средствами, управляемыми оператором, и беспилотными мобильными средствами предложенных концептуальных моделей при оснащении их комплексом систем, обеспечивающих возможность реализации полностью беспилотного управления.

²Зангиев А. А., Скороходов А. Н. Практикум по эксплуатации машинно-тракторного парка. Издание 3-е, Стереотипное. СПб.: изд-во "Лань", 2018. 464 с.

³Ряднов А. И. Эксплуатация машинно-тракторного парка: курс лекций. Изд. второе, доп. и перераб. Волгоград: Волгоградский ГАУ, 2020. 180 с.

⁴Эксплуатация машинно-тракторного парка. Г. Г. Маслов, Е. М. Юдина, Н. А. Ринас [и др.]. Краснодар: Кубанский ГАУ имени И. Т. Трубиллина, 2022. 205 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=rpgunh> EDN: RPGUNH

Результаты и их обсуждение. В общем случае расчетная производительность агрегата за смену определяется по формуле⁵:

$$W = 0,1 \cdot B_p \cdot \beta \cdot V_p \cdot \tau \cdot T_{см}, \quad (1)$$

где B_p – рабочая ширина захвата агрегата, м; β – коэффициент использования ширины захвата; V_p – рабочая скорость движения агрегата, км/ч; τ – коэффициент использования времени смены; $T_{см}$ – время смены, ч.

Рабочая ширина захвата агрегата зависит от типа используемой сельскохозяйственной машины, которая зависит от множества факторов, включая тяговый класс трактора.

Коэффициент использования ширины захвата для базового трактора определяется по формуле⁶:

$$\beta_6^i = \frac{B_p^i - B_{пб}}{B_p^i}, \quad (2)$$

где B_p^i – рабочая ширина захвата агрегата при работе с трактором i -го тягового класса, м;

$B_{пб}$ – ширина перекрытия при использовании базового трактора, м.

При использовании беспилотных мобильных средств за счет применения точных систем вождения ширина перекрытия будет отличаться от базовой модели. Например, в соответствии с существующими агротехническими требованиями к проведению сплошной культивации перекрытие между смежными проходами

агрегата должно быть не менее 0,10...0,15 м [12]. Современные высокоточные системы геоопозиционирования уже давно доказали свою эффективность и позволяют снизить ширину перекрытия до 0,02 м [13].

В таком случае будет справедливо неравенство:

$$B_{пб} > B_{пбс}, \quad (3)$$

где $B_{пбс}$ – ширина перекрытия при использовании беспилотных мобильных средств, м.

Таким образом, применение беспилотных (роботизированных) мобильных средств должно позволить увеличить значение коэффициента использования ширины захвата агрегата по сравнению с базовыми серийно выпускающимися тракторами:

$$\beta_6 < \beta_{6с}, \quad (4)$$

где $\beta_{6с}$ – коэффициент использования ширины захвата при применении беспилотных мобильных средств.

Среди рассматриваемых концептуальных моделей коэффициент использования ширины захвата будет значительно отличаться при применении беспилотных мобильных средств модели В, поскольку эквивалентное число агрегатов будет увеличиваться с ростом тягового класса заменяемого базового трактора, что приведет к увеличению числа смежных проходов агрегатов (рис. 1).

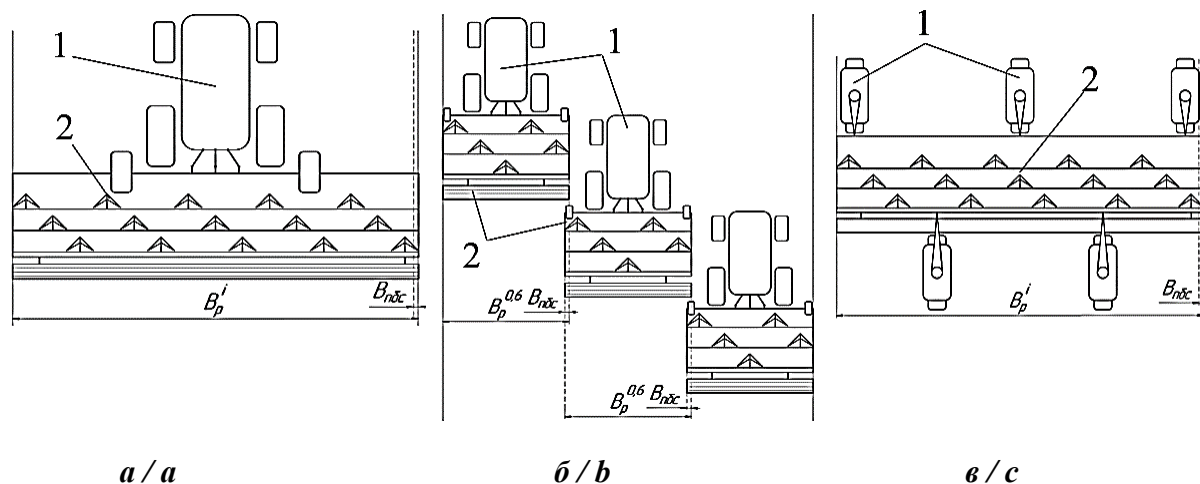


Рис. 1. Схема для расчета коэффициента использования ширины захвата агрегата в составе с беспилотными мобильными средствами: а – модель А; б – модель В; в – модель С; 1 – мобильное энергетическое средство, 2 – сельскохозяйственная машина /

Fig. 1. A scheme for calculating the utilization factor of the gripping width of the unit in combination with unmanned mobile vehicles: а – model А; б – model В; в – model С; 1 – mobile energy vehicle, 2 – agricultural machine

⁵Зангиев А. А., Скороходов А. Н. Указ. соч.

⁶Там же.

Как видно из схемы, при одинаковой ширине перекрытия для всех трех концептуальных моделей $B_{\text{пбс}}$ ширина захвата и производительность агрегата с беспилотным мобильным средством в концептуальной модели В при работе в одинаковых полевых условиях будет меньше, поскольку число смежных проходов на поле такого агрегата увеличится.

Поскольку при работе с беспилотными мобильными средствами в концептуальных моделях А и С используются практически одинаковые сельскохозяйственные машины одной ширины захвата, что также видно из схемы, коэффициент использования ширины захвата в концептуальных моделях А и С будет одинаковым, т. е. $\beta_A^i = \beta_C^i$, и определится по формуле:

$$\beta_A^i = \beta_C^i = \frac{B_p^i - B_{\text{пбс}}}{B_p^i}. \quad (5)$$

Коэффициент использования ширины захвата при применении беспилотных мобильных средств концептуальной модели В будет являться частным случаем использования беспилотных мобильных средств концептуальной модели А и определяться по формуле:

$$\beta_B = \frac{B_p^{0,6} - B_{\text{пбс}}}{B_p^{0,6}}. \quad (6)$$

В таком случае при любом $i > 0,6$ верно неравенство:

$$\beta_B < \beta_A^i = \beta_C^i. \quad (7)$$

Таким образом, при использовании агрегатов с беспилотными мобильными средствами различных концептуальных моделей с тяговыми классами выше 0,6 коэффициент использования ширины захвата агрегата с беспилотным мобильным средством в концептуальной модели В будет ниже.

Рабочая скорость агрегата зависит от конкретной марки применяемого трактора и определяется в первую очередь агротехническими требованиями [17], поэтому при проведении теоретических исследований считаем, что беспилотные средства всех рассматриваемых концептуальных моделей развития и традиционный пилотируемый трактор будут иметь одинаковую рабочую скорость.

Для оценки непроизводительных потерь времени используется коэффициент времени смены τ , который определяется по формуле⁷:

$$\tau = \frac{T_0}{T_{\text{см}}}, \quad (8)$$

где T_0 – время основной работы агрегата за смену, ч; $T_{\text{см}}$ – продолжительность смены, ч.

Время основной работы агрегата за смену T_0 рассчитывается по формуле⁸:

$$T_0 = \frac{T_{\text{см}} - (T_{\text{пз}} + T_{\text{лн}})}{(1 + K_{\text{пов}})(1 + K_{\text{обс}} + K_{\text{отд}}) \cdot 60}, \quad (9)$$

где $T_{\text{пз}}$ – время выполнения подготовительно-заключительных операций на агрегате, ч;

$T_{\text{лн}}$ – время на личные надобности оператора, ч;

$K_{\text{отд}}$ – коэффициент времени отдыха;

$K_{\text{обс}}$ – коэффициент обслуживания агрегата за смену; $K_{\text{пов}}$ – коэффициент затрат времени на повороты агрегата в конце гона.

В случае использования беспилотных средств исключаются затраты времени на личные надобности оператора и отдых. В таком случае время основной работы агрегатов за смену при использовании беспилотных средств $T_{\text{обс}}$ определяется по формуле:

$$T_{\text{обс}} = \frac{T_{\text{см}} - T_{\text{пз}}}{(1 + K_{\text{пов}})(1 + K_{\text{обс}}) \cdot 60}. \quad (10)$$

Коэффициент затрат времени на повороты агрегата в конце гона $K_{\text{пов}}$ при использовании трактора и беспилотных мобильных средств различных концептуальных моделей развития будет отличаться.

В общем случае коэффициент затрат времени на повороты агрегата в конце гона $K_{\text{пов}}$ определяется по формуле:

$$K_{\text{пов}} = \frac{t_{\text{пов}} \cdot V_p}{L}, \quad (11)$$

где $t_{\text{пов}}$ – время, затрачиваемое на поворот, с; V_p – рабочая скорость агрегата, м/с; L – длина гона, м.

Время, затрачиваемое на поворот $t_{\text{пов}}$, зависит от способа движения и вида поворота [14] и может быть определено по формуле:

$$t_{\text{пов}} = \frac{L_{\text{пов}}}{V_{\text{пов}}}, \quad (12)$$

где $L_{\text{пов}}$ – путь, проходимый агрегатом при повороте, м; $V_{\text{пов}}$ – скорость движения агрегата при совершении поворота, м/с.

Поскольку скорость движения агрегата при повороте сложно повысить, принимаем, что она одинакова как при использовании базового трактора, так и в случае применения беспилотных мобильных средств.

Путь, проходимый агрегатом при повороте, зависит от кинематических свойств агрегата и выбранного способа движения [15, 18, 19, 20]. При проведении расчетов принимаем челночный способ движения агрегата с петлевыми грушевидными разворотами (рис. 2).

⁷Зангиев А. А., Скороходов А. Н. Указ. соч.

⁸Там же.

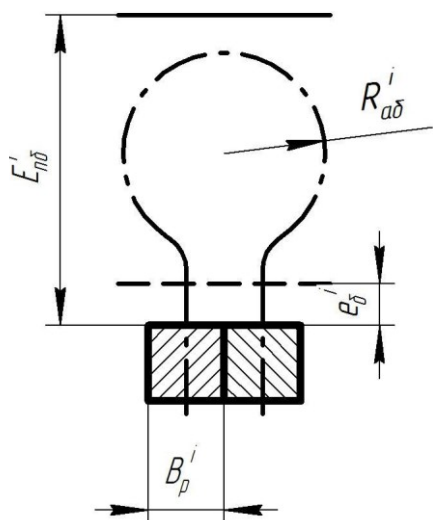


Рис. 2. Расчетная схема определения пути, проходимого агрегатом с базовым трактором i -го тягового класса при осуществлении петлевого грушевидного поворота: $R_{a\delta}^i$ – минимальный радиус поворота агрегата с базовым трактором i -го тягового класса, м; e_{δ}^i – длина выезда и въезда агрегата с базовым трактором i -го тягового класса, м; B_p^i – рабочая ширина захвата агрегата с базовым трактором i -го тягового класса, м; $E_{пб}^i$ – ширина поворотной полосы агрегата с базовым трактором i -го тягового класса, м /

Fig. 2. Calculation scheme for determining the path traversed by an aggregate with a basic tractor of the i -th traction class during a looped pear-shaped turn: $R_{a\delta}^i$ – the minimum turning radius of the unit with a basic tractor of the i -th traction class, m; e_{δ}^i – the length of the exit and entrance of the unit with a basic tractor of the i -th traction class, m; B_p^i – the working width of the unit with a basic tractor of the i -th traction class, m; $E_{пб}^i$ – the width of the turning lane of the unit with a basic tractor of the i -th traction class, m

В таком случае проходимый агрегатом с базовым трактором путь при повороте определяется по формуле:

$$L_{повб}^i = 6R_{a\delta}^i + 2e_{\delta}^i, \quad (13)$$

где $R_{a\delta}^i$ – минимальный радиус поворота агрегата с базовым трактором i -го тягового класса, м; e_{δ}^i – длина выезда и въезда агрегата с базовым трактором i -го тягового класса (расстояние от

центра агрегата до самых крайних рабочих органов машины), м.

Для МТА с навесными рабочими машинами наименьший радиус поворота может быть принят равным конструктивному радиусу поворота трактора.

Кинематическая схема поворота беспилотных мобильных средств различных концептуальных моделей представлена на рисунке 3.

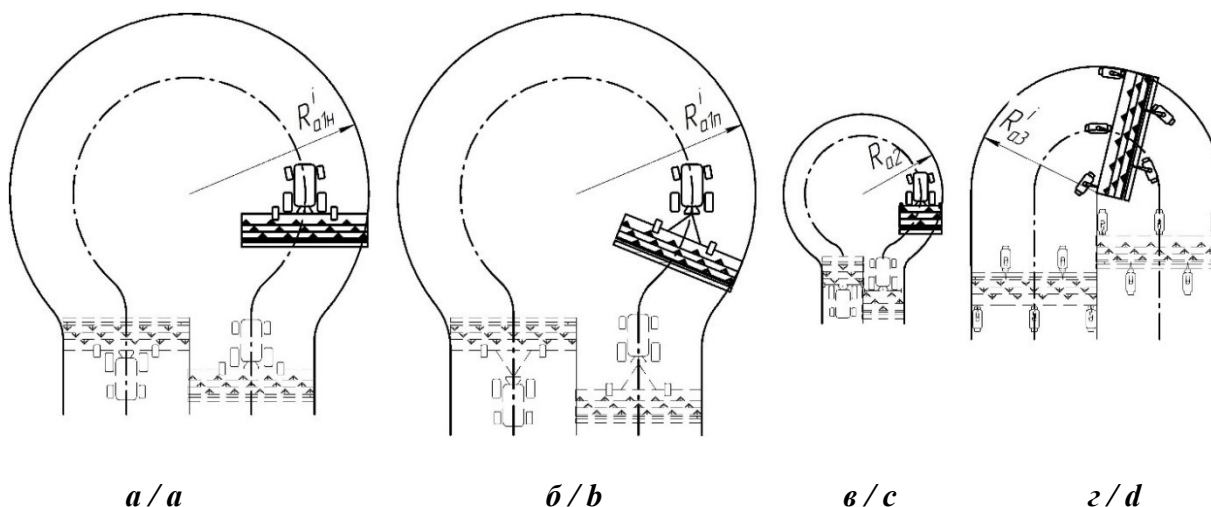


Рис. 3. Кинематическая схема поворота агрегатов на основе беспилотных мобильных средств: а – концептуальная модель А с навесной сельскохозяйственной машиной; б – концептуальная модель А с прицепной сельскохозяйственной машиной; в – концептуальная модель В; з – концептуальная модель С; $R_{a\delta}^i$ – минимальный радиус поворота агрегата в составе из беспилотного мобильного средства i -го тягового класса концептуальной модели А и навесной сельскохозяйственной машины, м; $R_{a\delta}^i$ – минимальный радиус поворота агрегата в составе из беспилотного мобильного средства i -го тягового класса концептуальной модели А и прицепной сельскохозяйственной машины, м; $R_{a\delta}^i$ – минимальный радиус поворота агрегата в составе с беспилотным мобильным средством концептуальной модели В, м; $R_{a\delta}^i$ – минимальный радиус поворота агрегата в составе с энергомодулями концептуальной модели С /

Fig. 3. Kinematic scheme of rotation of units based on unmanned mobile vehicles: а – conceptual model A with a mounted agricultural machine; б – conceptual model A with a trailed agricultural machine; в – conceptual model B; д – conceptual model C; $R_{a\delta}^i$ – the minimum turning radius of the unit consisting of an unmanned mobile vehicle of the i -th traction class of the conceptual model A and a mounted agricultural machine, m; $R_{a\delta}^i$ – the minimum turning radius of the unit consisting of an unmanned mobile vehicle of the i -th traction class of the conceptual model A and a trailed agricultural machine, m; $R_{a\delta}^i$ – the minimum turning radius of the unit in combination with an unmanned mobile vehicle of the conceptual model B, m; $R_{a\delta}^i$ – the minimum turning radius of the unit in the composition with energy modules of the conceptual model C

Поскольку кинематические свойства агрегата с базовым трактором i -го тягового класса и беспилотным мобильным средством в концептуальной модели А i -го тягового класса одинаковые, то минимальный радиус поворота мобильного средства в концептуальной модели А с навесной сельскохозяйственной машиной будет равен минимальному конструктивному радиусу поворота базового трактора:

$$R_{aAn}^i = R_{aBn}^i = R_6^i, \quad (14)$$

где R_{aAn}^i – минимальный радиус поворота агрегата в составе с мобильным средством концептуальной модели А i -го тягового класса и навесной сельскохозяйственной машиной, м; R_{aBn}^i – минимальный радиус поворота агрегата в составе с базовым трактором i -го тягового класса и навесной сельскохозяйственной машиной, м; R_6^i – минимальный конструктивный радиус поворота базового трактора i -го тягового класса, м.

При составлении широкозахватных агрегатов с прицепными сельскохозяйственными машинами радиус поворота принимается равным ширине захвата агрегата, т. е.

$$R_{aAp}^i = R_{aBp}^i = B_p^i, \quad (15)$$

где R_{aAp}^i – минимальный радиус поворота агрегата в составе с базовым трактором i -го тягового класса и прицепной сельскохозяйственной машиной, м; R_{aBp}^i – минимальный радиус поворота агрегата в составе с беспилотным мобильным средством концептуальной модели А i -го тягового класса и прицепной сельскохозяйственной машиной, м.

При использовании беспилотных мобильных средств в концептуальной модели В, как частного случая использования беспилотных мобильных средств концептуальной модели А, минимальный радиус поворота беспилотных мобильных средств концептуальной модели В будет равен минимальному конструктивному радиусу поворота базового трактора тягового класса 0,6:

$$R_{aB}^{0,6} = R_{a6}^{0,6} = R_6^{0,6}, \quad (16)$$

где $R_6^{0,6}$ – минимальный радиус поворота базового трактора тягового класса 0,6, м.

Конструкция агрегата на базе энергомодулей в концептуальной модели С позволяет реализовать поворот относительно центра агрегата, однако, при выполнении полевых работ челночным способом наиболее оптимальным является поворот относительно крайней точки агрегата с радиусом поворота, равным ширине

захвата агрегата. Поэтому при использовании агрегатов с энергомодулями радиус поворота принимаем равным ширине захвата агрегата:

$$R_{aC}^i = B_p^i. \quad (17)$$

В таком случае использование энергомодулей модели С позволяет по сравнению с беспилотными средствами модели А, агрегатируемыми с не широкозахватными агрегатами, обеспечить меньшие радиус поворота, проходимый при повороте путь, и затрачиваемое на поворот время.

Длина выезда агрегата e_6^i характеризует расстояние, на которое необходимо отвести центр агрегата для выведения рабочих органов машины на контрольную линию. В общем случае для навесных сельскохозяйственных машин она рассчитывается по формуле:

$$e_6^i = l_6^i + l_{mn6}^i, \quad (18)$$

где l_6^i – кинематическая длина базового трактора i -го тягового класса, м; l_{mn6}^i – кинематическая (габаритная) длина навесной машины для работы с базовым трактором i -го тягового класса, м.

При использовании однотипных навесных сельскохозяйственных машин их кинематическая длина считается одинаковой:

$$l_{m6}^i = l_{mA}^i = l_{mB}^i = l_{mC}^i. \quad (19)$$

В случае использования прицепных сельскохозяйственных машин длина выезда агрегата рассчитывается по формуле:

$$e_6^i = l_6^i + l_{мп6}^i, \quad (20)$$

где $l_{мп6}^i$ – кинематическая (габаритная) длина прицепной машины для работы с базовым трактором i -го тягового класса, м.

Как видно из представленной на рисунке 3 схемы поворота, кинематическая длина прицепной машины больше, чем при использовании навесной машины той же ширины захвата.

При реализации модели В, как частного случая использования концептуальной модели В, длина выезда агрегата $e_6^{0,6}$ определяется по формуле:

$$e_6^{0,6} = l_6^{0,6} + l_{mn6}^{0,6}, \quad (21)$$

где $l_6^{0,6}$ – кинематическая длина базового трактора тягового класса 0,6, м; $l_{mn6}^{0,6}$ – кинематическая (габаритная) длина навесной машины для работы с мобильным средством тягового класса 0,6, м.

При реализации концептуальной модели С за счет энергомодулей, расположенных непосред-

ственно на раме сельскохозяйственной машины, длина выезда агрегата e_C^i будет равна кинематической длине сельскохозяйственной машины, т. е. $e_C^i = l_{MC}^i$.

В этом случае минимальный радиус поворота агрегата в составе с энергомодулями модели С составит половину длины дуги окружности с радиусом R_{aC}^i , а путь, проходимый агрегатом при повороте, определится по формуле:

$$L_{пов С}^i = \pi \cdot R_{aC}^i + 2 \cdot l_{MC}^i = \pi \cdot B_p^i + 2 \cdot l_{MC}^i. \quad (22)$$

Тогда коэффициент затрат времени на повороты агрегата с энергомодулями модели С в конце гона $K_{пов С}^i$ будет определяться по формуле:

$$K_{пов С}^i = \frac{\pi \cdot B_p^i + 2 \cdot l_{MC}^i}{L}. \quad (23)$$

Таким образом, коэффициент затрат времени на повороты агрегатов с беспилотными мобильными средствами на базе энерго-

модулей напрямую связан с шириной захвата и кинематической длиной сельскохозяйственной машины.

С использованием предложенных методологических подходов осуществлена сравнительная оценка производительности агрегатов для сплошной культивации почвы в составе с беспилотными мобильными средствами предлагаемых концептуальных моделей беспилотных мобильных средств по сравнению с традиционным пилотируемым трактором (базовый трактор).

Агрегат для сплошной культивации почвы формировался из мобильного средства и культиватора для сплошной обработки почвы. Расчетные значения коэффициента использования ширины захвата агрегатов для сплошной культивации приведены в таблице 1.

Расчетные значения коэффициента затрат времени на повороты агрегата в конце гона и коэффициента использования времени смены приведены в таблицах 2 и 3 соответственно.

Таблица 1 – Коэффициент использования ширины захвата агрегатов для сплошной культивации /
Table 1 – The coefficient of use of the width of the gripping units for continuous cultivation

Модель / Model	Тяговый класс / Traction class						
	1,4	2	3	4	5	6	8
A	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
B	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
C	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Базовый трактор / Basic tractor	0,95	0,97	0,98	0,98	0,98	0,99	0,99

Таблица 2 – Расчетные значения коэффициента затрат времени на повороты агрегата в конце гона /
Table 2 – Calculated values of the coefficient of time spent on the rotation of the unit at the end of the run

Модель / Model	Тяговый класс / Traction class						
	1,4	2	3	4	5	6	8
A	0,06	0,08	0,09	0,09	0,11	0,12	0,15
B	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
C	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05	0,06	0,09
Базовый трактор / Basic tractor	0,06	0,08	0,09	0,09	0,11	0,12	0,15

Таблица 3 – Расчетные значения коэффициента использования времени смены /
Table 3 – Calculated values of the shift time utilization factor

Модель / Model	Тяговый класс / Traction class						
	1,4	2	3	4	5	6	8
A	0,90	0,88	0,88	0,87	0,86	0,85	0,83
B	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92
C	0,93	0,93	0,92	0,92	0,91	0,90	0,87
Базовый трактор / Basic tractor	0,83	0,81	0,80	0,80	0,79	0,79	0,77

С учетом полученных расчетных значений рассчитана сменная производительность агрегатов (табл. 4), а также осуществлена сравнительная оценка производительности агрегатов для сплошной культивации в составе с беспилотными мобильными средствами раз-

личных концептуальных моделей относительно агрегатов в составе с традиционными пилотируемыми тракторами соответствующих тяговых классов в форме процента прироста сменной производительности (рис. 4).

Таблица 4 – Расчетные значения сменной производительности агрегатов, га/см
Table 4 – Calculated values of the replaceable productivity of aggregates, ha/cm

Тяговый класс / Traction class	Модель / Model			Базовый трактор / Basic tractor
	A	B	C	
1,4	28,79	26,07	26,72	25,32
2	42,17	39,1	44,31	37,61
3	55,92	52,13	58,77	50,17
4	69,67	78,2	73,06	63,02
5	82,49	91,23	86,81	74,87
6	109,23	117,29	107,58	99,45
8	159,84	169,42	167,76	145,82

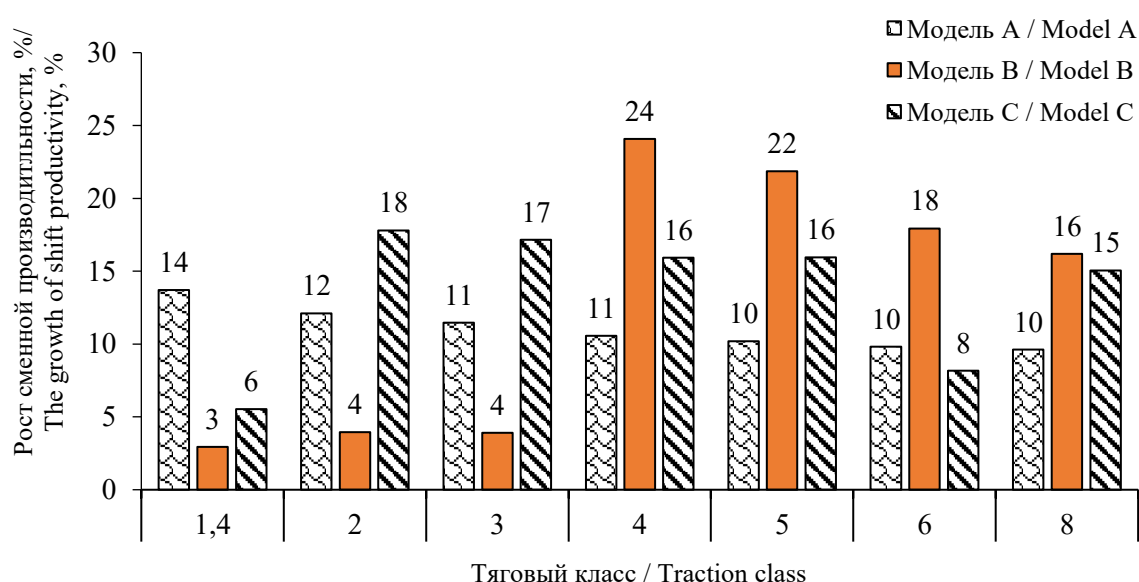


Рис. 4. Процент прироста сменной производительности агрегатов для сплошной культивации в составе с беспилотными мобильными средствами различных концептуальных моделей относительно агрегатов в составе с традиционными пилотируемыми тракторами соответствующих тяговых классов /
Fig. 4. Percentage increase in the replaceable productivity of units for continuous cultivation in combination with unmanned mobile vehicles of various conceptual models relative to units in combination with traditional manned tractors of the corresponding traction classes

Выводы. Проведенный анализ влияющих на производительность сельскохозяйственного агрегата при выполнении полевых операций факторов показывает, что при применении беспилотных мобильных средств может быть обеспечен рост производительности агрегата за счет увеличения коэффициента использования ширины захвата и времени основной работы за счет исключения затрат времени на

отдых и личные нужды оператора, сокращения затрат времени при разворотах агрегата в конце гона. Разработанные методологические подходы к вопросу расчета производительности сельскохозяйственных агрегатов в составе с беспилотными мобильными средствами сельскохозяйственного назначения предусматривают изменения в формулах расчета коэффициента использования времени основной

работы путем исключения затрат времени на отдых и личные нужды оператора, сокращения затрат времени при разворотах агрегата в конце гона, что позволяет более точно оценить рост производительности агрегатов при использовании беспилотных мобильных средств различных концептуальных моделей и осуществить их сравнительную оценку.

С использованием предложенных методологических подходов осуществлена сравнительная оценка производительности агрегатов для сплошной культивации почвы в составе с беспилотными мобильными средствами пред-

лагаемых концептуальных моделей беспилотных мобильных средств по сравнению с традиционным пилотируемым трактором, которая показывает, что применение беспилотных мобильных средств рассматриваемых концептуальных моделей может позволить повысить сменную производительность агрегатов для сплошной культивации по сравнению с традиционными пилотируемыми тракторами на уровень от 3 до 24 % в зависимости от применяемой концептуальной модели беспилотного мобильного средства и тягового класса, в котором осуществляется сравнение.

Список литературы

1. Лобачевский Я. П., Бейлис В. М., Ценч Ю. С. Аспекты цифровизации Системы технологий и машин. Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2019;(3(36)):40–45.
Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41192528> EDN: RLCDDO
2. Rondelli V., Franceschetti B., Mengoli D. A Review of Current and Historical Research Contributions to the Development of Ground Autonomous Vehicles for Agriculture. Sustainability 2022;14(15):9221.
DOI: <https://doi.org/10.3390/su14159221>
3. Аксенов А. Г. Анализ интеллектуальных систем поддержки принятия решений в сельском хозяйстве. Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2019;(3(36)):46–51.
Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41192529> EDN: CECDAH
4. Старостин И. А., Давыдова С. А., Ещин А. В. Интеллектуальная система управления сельскохозяйственными роботами: формирование структуры. Агроинженерия. 2023;25(3):49–56.
DOI: <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-3-49-56> EDN: SUYDSC
5. Fountas S., Mylonas N., Malounas I., Rodias E., Hellmann Santos C., Pekkeriet E. Agricultural Robotics for Field Operations. Sensors. 2020;20(9):2672. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20092672>
6. Lytridis C., Kaburlasos V. G., Pachidis T., Manios M., Vrochidou E., Kalampokas T., Chatzistamatis S. An Overview of Cooperative Robotics in Agriculture. Agronomy. 2021;11(9):1818.
DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy11091818>
7. 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
8. Starostin I. A., Eshchin A. V., Davydova S. A. Global trends in the development of agricultural robotics. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2023;(1138):012042.
DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1138/1/012042>
9. Ramírez-Ochoa D.-D., Pérez-Domínguez L. A., Martínez-Gómez E.-A., Luviano-Cruz D. PSO, a Swarm Intelligence-Based Evolutionary Algorithm as a Decision-Making Strategy: A Review. Symmetry. 2022;14(3):455.
DOI: <https://doi.org/10.3390/sym14030455>
10. Grimstad L., From P. J. The Thorvald II Agricultural Robotic System. Robotics. 2017;6(4):24.
DOI: <https://doi.org/10.3390/robotics6040024>
11. Союнов А. С., Прокопов С. П., Головин А. Ю., Сабиев У. К., Мальцева Е. И. Изыскание современных факторов, влияющих на эффективность работы машинно-тракторных агрегатов. Вестник Омского государственного аграрного университета. 2021;(4(44)):232–240.
DOI: https://doi.org/10.48136/2222-0364_2021_4_232 EDN: AIDMXZ
12. Старовойтов С. И., Ценч Ю. С., Коротченя В. М., Личман Г. И. Технические системы цифрового контроля качества обработки почвы. Сельскохозяйственные машины и технологии. 2020;14(1):16–21.
DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2020-14-1-16-21> EDN: HYFQAN
13. Бобков С. И. Эффективность навигационных систем при проведении сельскохозяйственных работ. Техника и оборудование для села. 2020;(3(273)):8–12. DOI: <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2020-3-8-12> EDN: AUCOEA
14. Маршанин Е. В., Сурин Р. О., Михайлов А. В., Беляков Д. В., Кузнецов Е. Е., Щитов С. В. Оценка влияния физико-механических свойств почвы на производительность колёсного агрегата. АгроЭкоИнфо. 2023;(3(57)):23. Режим доступа: <https://elibrary.ru/iwovnk> EDN: IWOVNK
15. Damanauskas V., Janulevičius A. Validation of Criteria for Predicting Tractor Fuel Consumption and CO2 Emissions When Ploughing Fields of Different Shapes and Dimensions. AgriEngineering. 2023;5(4):2408–2422.
DOI: <https://doi.org/10.3390/agriengineering5040148>

16. Мардарьев С. Н., Акимов А. П., Медведев В. И., Зайцев П. В., Казаков Ю. Ф., Юнусов Г. С., Ларкин С. В. Основные параметры работы трактора К-424 (Кириша) в составе пахотного агрегата в условиях адаптивно-ландшафтного земледелия. Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2018;13(2(49)):118–123. DOI: https://doi.org/10.12737/article_5b3508d43df482.45257283 EDN: TMENEW
17. Лобачевский Я. П., Лонин С. Э., Алексеев И. С., Гончаров Н. Т., Афолина И. И., Ильченко Е. Н. Разработка алгоритмов и программного обеспечения систем управления движением роботизированного почвообрабатывающего агрегата. Сельскохозяйственные машины и технологии. 2019;13(2):48–52. DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-12-6-48-52> EDN: PLAHMR
18. Wang Q., He J., Lu C., Wang C., Lin H., Yang H., Li H., Wu Z. Modelling and Control Methods in Path Tracking Control for Autonomous Agricultural Vehicles: A Review of State of the Art and Challenges. Applied Sciences. 2023;13(12):7155. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13127155>
19. Пухов Е. В., Мешкова С. С., Кочкин С. С. Разработка имитационной модели движения сельскохозяйственных агрегатов на поле. Международный технико-экономический журнал. 2022;(3):16–26. DOI: <https://doi.org/10.34286/1995-4646-2022-84-3-16-26> EDN: GKLIMZ
20. Han X., Kim H.-J., Jeon C. W., Kim J. H. Simulation Study to Develop Implement Control and Headland Turning Algorithms for Autonomous Tillage Operations. Journal of Biosystems Engineering. 2019;44(1):245–257. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42853-019-00035-9>

References

1. Lobachevskiy Ya. P., Beylis V. M., Tsench Yu. S. Digitization aspects of the system of technologies and machines. *Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK*. 2019;(3(36)):40–45. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41192528>
2. Rondelli V., Franceschetti B., Mengoli D. A Review of Current and Historical Research Contributions to the Development of Ground Autonomous Vehicles for Agriculture. Sustainability 2022;14(15):9221. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14159221>
3. Aksenov A. G. Analysis of intelligent decision support systems in agriculture. *Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK*. 2019;(3(36)):46–51. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41192529>
4. Starostin I. A., Davydova S. A., Eshchin A. V. Intelligent agricultural robot control system: structure formation. *Agroinzheneriya = Agricultural Engineering (Moscow)*. 2023;25(3):49–56. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-3-49-56>
5. Fountas S., Mylonas N., Malounas I., Rodias E., Hellmann Santos C., Pekkeriet E. Agricultural Robotics for Field Operations. Sensors. 2020;20(9):2672. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20092672>
6. Lytridis C., Kaburlasos V. G., Pachidis T., Manios M., Vrochidou E., Kalampokas T., Chatzistamatis S. An Overview of Cooperative Robotics in Agriculture. Agronomy. 2021;11(9):1818. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy11091818>
7. 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>
8. Starostin I. A., Eshchin A. V., Davydova S. A. Global trends in the development of agricultural robotics. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2023;(1138):012042. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1138/1/012042>
9. Ramírez-Ochoa D.-D., Pérez-Domínguez L. A., Martínez-Gómez E.-A., Luviano-Cruz D. PSO, a Swarm Intelligence-Based Evolutionary Algorithm as a Decision-Making Strategy: A Review. Symmetry. 2022;14(3):455. DOI: <https://doi.org/10.3390/sym14030455>
10. Grimstad L., From P. J. The Thorvald II Agricultural Robotic System. Robotics. 2017;6(4):24. DOI: <https://doi.org/10.3390/robotics6040024>
11. Soyunov A. S., Prokopov S. P., Golovin A. Yu., Sabiev U. K., Maltseva E. I. The investigation of modern factors affecting the efficiency of machine and tractor aggregates. *Vestnik Omskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Vestnik of Omsk SAU*. 2021;(4(44)):232–240. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.48136/2222-0364_2021_4_232
12. Starovoytov S. I., Tsench Yu. S., Korotchenya V. M., Lichman G. I. Technical Systems for Digital Soil Quality Control. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii = Agricultural Machinery and Technologies*. 2020;14(1):16–21. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2020-14-1-16-21>
13. Bobkov S. I. Efficiency of navigation systems when performing agricultural works. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela = Machinery and Equipment for Rural Area*. 2020;(3(273)):8–12. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2020-3-8-12>
14. Marshanin E. V., Surin R. O., Mikhaylov A. V., Belyakov D. V., Kuznetsov E. E., Shchitov S. V. Assessment of the influence of the physical and mechanical properties of the soil on the performance of the wheel unit. *AgroEkoInfo = AgroEcoInfo*. 2023;(3(57)):23. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/iwovnk>

15. Damanauskas V., Janulevičius A. Validation of Criteria for Predicting Tractor Fuel Consumption and CO₂ Emissions When Ploughing Fields of Different Shapes and Dimensions. *AgriEngineering*. 2023;5(4):2408–2422. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriengineering5040148>
16. Mardar'ev S. N., Akimov A. P., Medvedev V. I., Zaytsev P. V., Kazakov Yu. F., Yunusov G. C., Larkin S. V. Main parameters of tractor K-424 (Kiryusha) work in the composition of the aperry unit in the conditions of adaptive landscape agriculture. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Vestnik of the Kazan State Agrarian University. 2018;13(2(49)):118–123. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.12737/article_5b3508d43df482.45257283
17. Lobachevsky Ya. P., Lonin S. E., Alekseev I. S., Goncharov N. T., Afonina I. I., Il'chenko E. N. Development of Algorithms and Software Systems for Motion Control of a Robotic Tillage Unit. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii* = Agricultural Machinery and Technologies. 2019;13(2):48–52. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-12-6-48-52>
18. Wang Q., He J., Lu C., Wang C., Lin H., Yang H., Li H., Wu Z. Modelling and Control Methods in Path Tracking Control for Autonomous Agricultural Vehicles: A Review of State of the Art and Challenges. *Applied Sciences*. 2023;13(12):7155. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13127155>
19. Pukhov E. V., Meshkova S. S., Kochkin S. S. Development of a simulation model of the movement of agricultural aggregates in the field. *Mezhdunarodnyy tekhniko-ekonomicheskyy zhurnal*. 2022;(3):16–26. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34286/1995-4646-2022-84-3-16-26>
20. Han X., Kim H.-J., Jeon C. W., Kim J. H. Simulation Study to Develop Implement Control and Headland Turning Algorithms for Autonomous Tillage Operations. *Journal of Biosystems Engineering*. 2019;44(1):245–257. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42853-019-00035-9>

Сведения об авторах

✉ **Старостин Иван Александрович**, кандидат техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории прогнозирования систем машин и технологий в АПК, 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/0000-0002-8890-1107>, e-mail: starwan@yandex.ru

Давыдова Светлана Александровна, кандидат техн. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории прогнозирования систем машин и технологий в АПК, 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>

Ещин Александр Вадимович, кандидат техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории прогнозирования систем машин и технологий в АПК, 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/0000-0002-9368-7758>

Годжаев Теймур Захидович, аспирант, заведующий сектором моделирования и оптимизации мобильных энергосредств, 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/0000-0002-4496-0711>

Information about the authors

✉ **Ivan A. Starostin**, PhD in Engineering, senior researcher, the Laboratory of Forecasting of Machine Systems and Technologies in the Agroindustrial Complex, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 1st Institutsky proezd, 5, Moscow, Russian Federation, 109428, e-mail: vim@vim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8890-1107>, e-mail: starwan@yandex.ru

Svetlana A. Davydova, PhD in Engineering, leading researcher, the Laboratory of Forecasting of Machine Systems and Technologies in the Agroindustrial Complex, 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>

Aleksandr V. Eshchin, PhD in Engineering, senior researcher, the Laboratory of Forecasting of Machine Systems and Technologies in the Agroindustrial Complex, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 1st Institutsky proezd, 5, Moscow, Russian Federation, 109428, e-mail: vim@vim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9368-7758>

Teimur Z. Godzhaev, graduate student, Head of the sector of Modeling and optimization of mobile energy facilities, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 1st Institutsky proezd, 5, Moscow, Russian Federation, 109428, e-mail: vim@vim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4496-0711>

✉ – Для контактов / Corresponding author



Статическая характеристика измерительного преобразователя угловой скорости для адаптивных систем управления гидравлическими приводами

© 2024. В. В. Голубовский, Н. А. Симанин, В. В. Коновалов ✉

ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет», г. Пенза, Российская Федерация

Цель исследований – получение статической характеристики измерительного преобразователя угловой скорости разработанной конструкции и определение его конструктивных параметров. Методика исследований предусматривает теоретическое обоснование статической характеристики предложенного измерительного преобразователя угловой скорости с инерционной заслонкой и соплами. В статье рассмотрен принцип действия различных конструкций измерительных преобразователей угловой скорости с инерционными массами. Обоснован вариант конструктивного исполнения измерительного преобразователя угловой скорости с инерционной заслонкой и соплами, для которого получена статическая характеристика. На основе полученных выражений определены основные конструктивные параметры устройства. Рассмотрена методика расчета статической характеристики измерительных преобразователей угловой скорости в адаптивной системе управления гидравлическим приводом. Полученное выражение статической характеристики предложенной конструкции измерительного преобразователя угловой скорости связывает внешнее возмущающее воздействие (угловую скорость) и перепад давлений в междрозсельных камерах в установившемся режиме работы. Рекомендуемые параметры элементов измерительного преобразователя угловой скорости: диаметр отверстия сопла в интервале 0,5–1,5 мм, диаметр торца сопла в интервале 1,2–1,5 диаметра отверстия сопла, ход заслонки до 0,1 диаметра отверстия сопла. Следует отметить, что при диаметрах отверстий постоянного дросселя и сопла меньше 0,5 мм, а также при перемещении заслонки менее 0,02 мм возможно возникновение облитерации, то есть зарастивание проходных сечений сопротивлений поляризованными молекулами жидкости, что нарушает работоспособность измерительного преобразователя угловых скоростей. Полученное выражение статической характеристики предложенной конструкции измерительного преобразователя угловой скорости с инерционной заслонкой и соплами позволяет определить конструктивные параметры его элементов и на их основе динамические характеристики.

Ключевые слова: гидрофицированное оборудование, система автоматического управления, датчик угловой скорости, регулятор частоты вращения, сопло-заслонка, статическая характеристика, соотношение параметров датчика

Благодарности: работа выполнена без финансового обеспечения в рамках инициативной тематики.

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Голубовский В. В., Симанин Н. А., Коновалов В. В. Статическая характеристика измерительного преобразователя угловой скорости для адаптивных систем управления гидравлическими приводами. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2024;25(3):495–506. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.3.495-506>

Поступила: 16.02.2024

Принята к публикации: 17.05.2024

Опубликована онлайн: 26.06.2024

Static characteristic of angular velocity measuring transducer for adaptive control systems of hydraulic drives

© 2024. Vitaly V. Golubovsky, Nikolay A. Simanin, Vladimir V. Konovalov ✉

Penza State Technological University, Penza, Russian Federation

The aim of the research is to obtain the static characteristic of the angular velocity measuring transducer of the developed design and to determine its design parameters. The research methodology provides theoretical substantiation of the static characteristic of the proposed angular velocity measuring transducer with inertial flap and nozzles. The paper considers the principle of operation of various designs of measuring transducers of angular velocity with inertial masses. The variant of constructive execution of angular velocity measuring transducer with inertial flap and nozzles is substantiated, for which the static characteristic is obtained. On the basis of the obtained expressions the main design parameters of the device are determined. The methodology of calculation of static characteristic of angular velocity measuring transducers in the adaptive control system of hydraulic drive is considered. The obtained expression of the static characteristic of the proposed design of the angular velocity measuring transducer connects the external disturbing influence (angular velocity) and the pressure drop in the inter-throttle chambers in the steady-state mode of operation. The recommended parameters of the elements of the angular velocity transducer are: nozzle orifice diameter in the range of 0.5–1.5 mm, nozzle face diameter in the range of 1.2–1.5 nozzle orifice diameter, flap stroke up to 0.1 nozzle orifice diameter. It should be noted that at diameters of permanent throttle and nozzle orifices less than 0.5 mm, as well as at the flap movement less than 0.02 mm, obliteration may occur, i.e. overgrowing of resistance passage sections by polarised liquid molecules, which breaks the performance of the angular velocity transducer.

The obtained expression of the static characteristic of the proposed design of the angular velocity transducer with an inertial flap and nozzles allows us to determine the design parameters of its elements and, on their basis, the dynamic characteristics.

Keywords: hydroficated equipment, automatic control system, angular velocity sensor, speed controller, nozzle-flap, static characteristic, sensor parameter ratio

Acknowledgments: the work was done without financial support in the framework of the initiative topics.

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

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

For citation: Golubovskiy V. V., Simanin N. A., Konovalov V. V. Static characteristic of angular velocity measuring transducer for adaptive control systems of hydraulic drives. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2024;25(3):495–506. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.3.495-506>

Received: 16.02.2024

Accepted for publication: 17.05.2024

Published online: 26.06.2024

В настоящее время системами автоматического управления оснащаются большое количество технологического оборудования, имеющего гидравлические приводы, включая грузоподъемные устройства лесного хозяйства [1, 2] и транспорта [3, 4]. Для гидравлических приводов вращательного движения следует использовать измерительные преобразователи угловой скорости (ИПУС), которые определяют качество переходных процессов в системе автоматического управления. Такой преобразователь предназначен для измерения и контроля угловой скорости объектов в системах автоматического регулирования гидравлических приводов промышленного оборудования, сельскохозяйственных, подъемных, транспортных и других технологических машинах. Дальнейшее повышение эффективности управления рабочими процессами невозможно без применения систем автоматического управления. Подобные системы получили широкое распространение, включая транспортные машины [5], производственное [6] и технологическое оборудование [7, 8]. Проектирование систем автоматического управления тесно связано с разработкой измерительных преобразователей [9, 10]. От их точности и чувствительности напрямую зависит быстродействие системы управления.

Анализ систем управления показывает, что для гидравлических систем автоматического управления поддержания скоростных показателей целесообразно использовать измерительные преобразователи на основе гидравлического усилителя типа «сопло-заслонка». Данный вид гидравлического усилителя получил широкое применение в строительной технике [11, 12] и транспорте [13, 14].

Цель исследований – получение статической характеристики измерительного преобразователя угловой скорости разработанной конструкции и определение его конструктивных параметров.

Научная новизна – получение выражений статической характеристики измерительного преобразователя угловых скоростей оригинальной/предлагаемой конструкции для работы гидравлического силового привода и системы его автоматического управления рабочими органами гидрофицированного технологического оборудования без многократного преобразования видов энергии.

Материал и методы. Методика исследований предусматривает теоретическое обоснование статической характеристики предложенного измерительного преобразователя угловой скорости. На основе полученных выражений определены основные конструктивные параметры устройства.

Для гидравлических приводов вращательного движения следует использовать измерительные преобразователи угловой скорости, которые служат в качестве источника информации о контролируемом параметре объекта и могут применяться в системах стабилизации скорости вращения рабочих органов в гидравлических приводах машин, при этом стабилизация угловой скорости достигается путем непрерывного регулирования расхода жидкости, подводимой к гидравлическому двигателю привода, в зависимости от изменения нагрузки. Возможность поддержания заданной угловой скорости валов обеспечивает снижение инерционных сил на механические элементы привода [15, 16, 17].

Основными конструктивными элементами преобразователей угловой скорости являются: инерционная масса, упругие элементы, постоянные и переменные сопротивления (дрессели), демпфирующие элементы и устройства и т. д.

В измерительных преобразователях переменные дроссели сопло-заслонка обычно используют совместно с последовательно включенными на их входах постоянными дросселями шайба или втулка, образующими мостовую измерительную схему (рис. 1). Между постоян-

ными и переменными сопротивлениями образованы междроссельные камеры, к которым (в диагональ моста) подключают исполни-

тельный элемент (автоматический регулятор) адаптивной системы управления гидравлическим приводом.

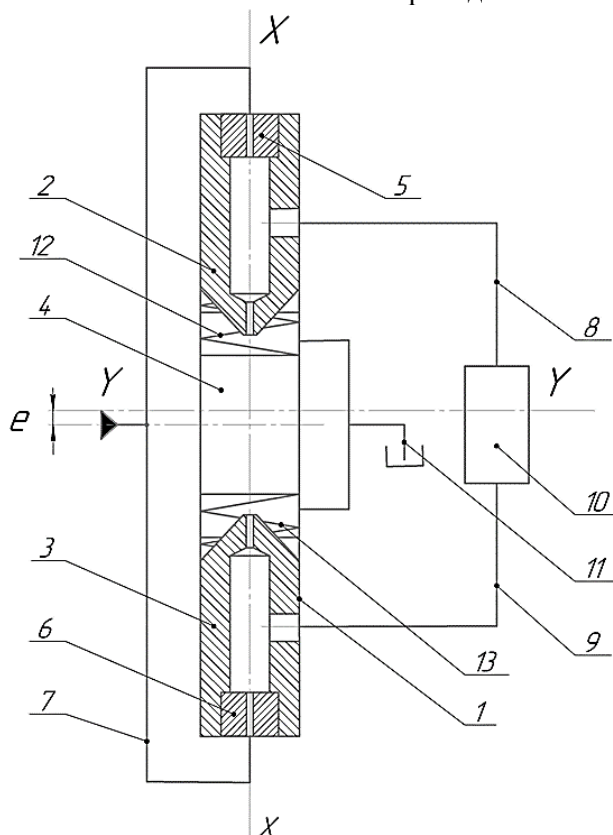


Рис. 1. Принципиальная схема измерительного преобразователя угловой скорости с инерционной заслонкой и соплами: 1 – корпус; 2, 3 – сопла; 4 – инерционная заслонка; 5, 6 – постоянные дроссели; 7 – напорная линия; 8, 9 – линии управления исполнительным элементом; 10 – исполнительный элемент (автоматический регулятор); 11 – сливная линия; 12, 13 – пружины /

Fig. 1. Principal scheme of angular velocity transducer with inertial flap and nozzles: 1 – housing; 2, 3 – nozzles; 4 – inertial flap; 5, 6 – permanent throttles; 7 – pressure line; 8, 9 – control lines of the executive element; 10 – executive element (automatic regulator); 11 – drain line; 12, 13 – springs

Ось вращения $Y - Y$ объекта, перпендикулярная оси чувствительности $X - X$, должна находиться на некотором расстоянии e от геометрического центра корпуса преобразователя. Центробежная сила F , действующая на инерционную заслонку, будет определяться зависимостью $F = m\omega^2 e$, где m – масса инерционной заслонки; ω – угловая скорость вращения объекта.

Конструктивная схема опытного образца инерционного измерительного преобразователя угловой скорости с элементами сопло-заслонка приведена на рисунке 2 [18]. Предварительная настройка измерительного преобразователя включает в себя два этапа.

Первый этап предусматривает настройку требуемых статических характеристик преобразователя (по расходу, по давлению в междроссельных камерах и т. д.), что обеспечивает

регулировка зазоров между торцами сопел 2, 3 и заслонкой 4, путем осевого смещения сопел по резьбе в корпусе 1, и одновременное изменение деформации центрирующих пружин 12 и 13. Зазоры между торцами сопел и заслонкой должны быть одинаковыми. Эту настройку можно производить вне ротора преобразователя.

Второй этап настройки предусматривает установку корпуса 1 в расточке ротора 15 преобразователя в положение, при котором геометрический центр находится на некотором заданном расстоянии от оси вращения $Y - Y$, для чего винтами 18 и 19 устанавливают и контргайками 22 и 23 фиксируют положение упоров 20 и 21.

Детали опытного образца инерционного измерительного преобразователя угловой скорости с элементами сопло-заслонка приведен на рисунке 3.

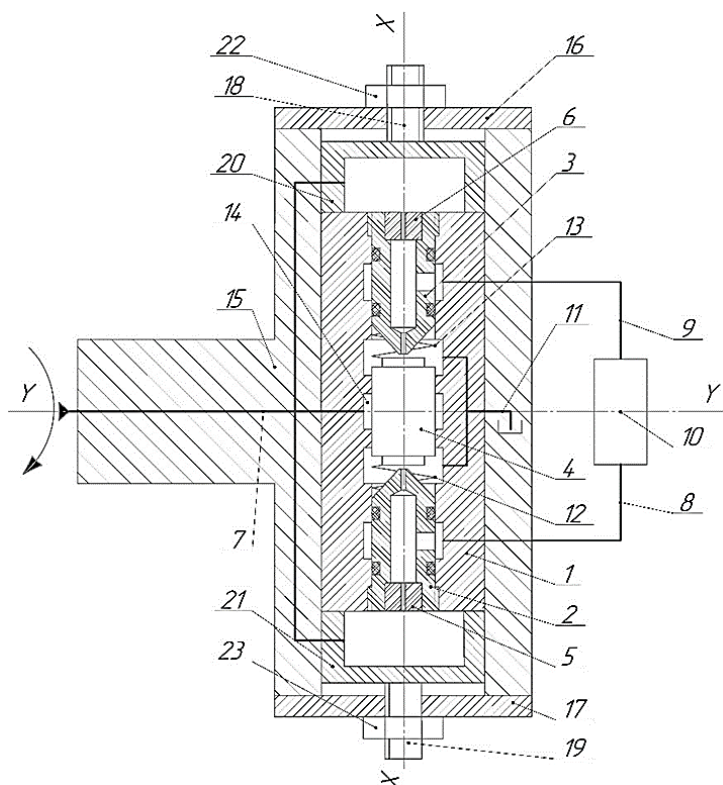


Рис. 2. Конструктивная схема измерительного преобразователя угловой скорости с инерционной заслонкой и соплами: 1 – корпус; 2, 3 – сопла; 4 – инерционная заслонка; 5, 6 – постоянные дроссели; 7 – напорная линия; 8, 9 – линии управления исполнительным элементом; 10 – исполнительный элемент (автоматический регулятор); 11 – сливная линия; 12, 13 – пружины; 14 – гидравлическая опора; 15 – ротор; 16, 17 – крышки; 18, 19 – регулировочные винты; 20, 21 – подвижные упоры; 22, 23 – контргайки /

Fig. 2. Design scheme of angular velocity transducer with inertial flap and nozzles: 1 – housing; 2, 3 – nozzles; 4 – inertial flap; 5, 6 – permanent throttles; 7 – pressure line; 8, 9 – control lines of the executive element; 10 – executive element (automatic regulator); 11 – drain line; 12, 13 – springs; 14 – hydraulic support; 15 – rotor; 16, 17 – covers; 18, 19 – adjusting screws; 20, 21 – movable stops; 22, 23 – lock nuts

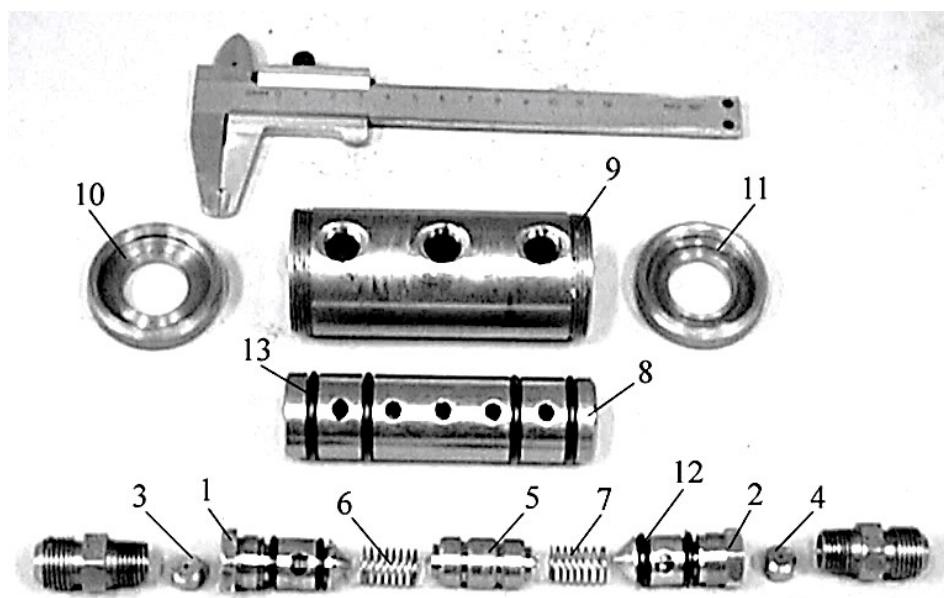


Рис. 3. Детали опытного образца инерционного измерительного преобразователя с элементами сопло-заслонка: 1, 2 – сопла; 3, 4 – постоянные дроссели; 5 – инерционная заслонка; 6, 7 – пружины; 8 – гильза; 9 – корпус; 10, 11 – крышки; 12, 13 – уплотнения /

Fig. 3. Details of the prototype of inertial measuring transducer with elements of nozzle-flap: 1, 2 – nozzles; 3, 4 – permanent throttles; 5 – inertial flap; 6, 7 – springs; 8 – sleeve; 9 – housing; 10, 11 – covers; 12, 13 – seals

Величина настроенного эксцентриситета, масса заслонки и силы пружин определяют чувствительность преобразователя. Изменяя эксцентриситет и предварительный натяг пружин, можно настраивать преобразователь на различные диапазоны измерения угловой скорости.

Подвод и отвод жидкости производится через неподвижный коллектор (на рис. 2 не показан) и каналы, выполненные в корпусе и роторе преобразователя.

Измерительный преобразователь угловой скорости работает следующим образом. Рабочая среда, подведенная с избыточным давлением в гидравлическую опору 14, создает равномерно распределенную по цилиндрической поверхности центрирующую силу, удерживающую заслонку 4 на оси чувствительности $X - X$. Жидкость, проходящая из опоры в сливные полости преобразователя и далее в сливную линию 11 через радиальные зазоры между корпусом и заслонкой, предотвращает возникновение сухого трения.

При вращении ротора преобразователя, соединенного с контролируемым объектом, возникает центробежная сила инерции, направленная вдоль оси чувствительности $X - X$ (на рис. 2, например, в сторону сопла 3). Центробежная сила будет пропорциональна массе заслонки, величине настроенного эксцентриситета и квадрату угловой скорости объекта.

Под действием этой силы заслонка 4 смещается и изменяет гидравлическое сопротивление сопел 2 и 3. Сопротивление истечению масла из сопла 2 уменьшается, а из сопла 3 увеличивается, что приводит к изменению давлений в междроссельных камерах и линиях управления исполнительным элементом, давление в линии 8 уменьшается, а в линии 9 увеличивается. Возникающая разность (перепад) давлений используется как управляющий сигнал на входах исполнительного элемента.

Для формирования выходного сигнала исполнительный элемент 10 выполняется в виде четырехщелевого золотникового распределителя с пружинным центрированием. Под действием разности давлений в линиях 8 и 9 управляющего сигнала и под торцами золотника последний смещается в своем корпусе, изменяя проходные сечения соответствующих щелей и, тем самым, формируя результирующий сигнал, который используется для автоматического управления приводом устройства.

Благодаря сравнительно небольшим габаритным размерам и массе измерительного преобразователя угловой скорости можно уста-

навливать на вращающихся валах привода промышленного оборудования в любом удобном для монтажа и обслуживания месте вне рабочей зоны, при этом ось чувствительности $X - X$ должна быть перпендикулярна оси вращения $Y - Y$ контролируемого объекта.

Измерительный преобразователь может быть встроен в детали, передающие вращение рабочим органам оборудования (шкив, муфта, маховик и т. д.), или использоваться в виде отдельного устройства, установленного на вращающихся частях машины.

Для упрощения конструкции разработана схема измерительного преобразователя угловой скорости с неподвижным корпусом, показанная на рисунке 4.

Настройка преобразователя зависит от заданного диапазона измерения угловой скорости, производится при не вращающемся роторе и предусматривает предварительную деформацию пружин регулировочными гайками, что определяет положение конических заслонок, расположенных на центробежных грузах относительно сопел. При этом в измерительной камере устанавливается максимальное рабочее давление жидкости.

Измерительный преобразователь угловой скорости работает следующим образом. При вращении ротора преобразователя, соединенного с контролируемым объектом, возникают центробежные силы инерции, которые воздействуют на грузы, установленные на цилиндрических направляющих, и заставляют их перемещаться радиально от оси вращения.

Конические заслонки смещаются относительно сопел, уменьшая сопротивление течению жидкости в сливную камеру. Давление в измерительной камере и на входе исполнительного элемента уменьшается на величину, пропорциональную угловой скорости вращения объекта.

Недостатком преобразователей, приведенных на рисунках 2 и 4, является невозможность их установки на сплошном валу между опорами. Этот недостаток устранен в измерительном преобразователе угловой скорости с инерционными грузами и элементами сопло-заслонка, конструктивная схема которого в исходном положении показана на рисунке 5.

Входы постоянных дросселей соединены с источником питания рабочей жидкостью с постоянным давлением $P_{п.}$ Постоянные дроссели и сопла соединены по мостовой схеме, а междроссельные камеры сопел сообщаются с полостями управления исполнительного механизма 15, включенного в диагональ моста.

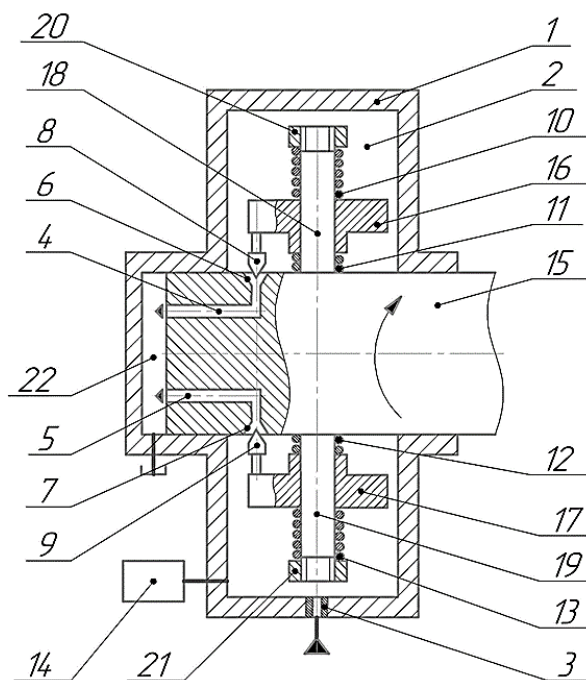


Рис. 4. Измерительный преобразователь угловой скорости с элементами сопло-заслонка: 1 – корпус; 2 – измерительная камера; 3 – постоянное сопротивление; 4, 5 – сливные линии сопел; 6, 7 – сопла; 8, 9 – конические заслонки; 10, 11, 12, 13 – пружины; 14 – исполнительный элемент; 15 – ротор; 16, 17 – центробежные грузы; 18, 19 – цилиндрические направляющие; 20, 21 – регулировочные гайки; 22 – сливная камера /

Fig. 4. Angular velocity transducer with nozzle-flap elements: 1 – body; 2 – measuring chamber; 3 – constant resistance; 4, 5 – nozzle drain lines; 6, 7 – nozzles; 8, 9 – conical flaps; 10, 11, 12, 13 – springs; 14 – actuator; 15 – rotor; 16, 17 – centrifugal weights; 18, 19 – cylindrical guides; 20, 21 – adjusting nuts; 22 – drain chamber

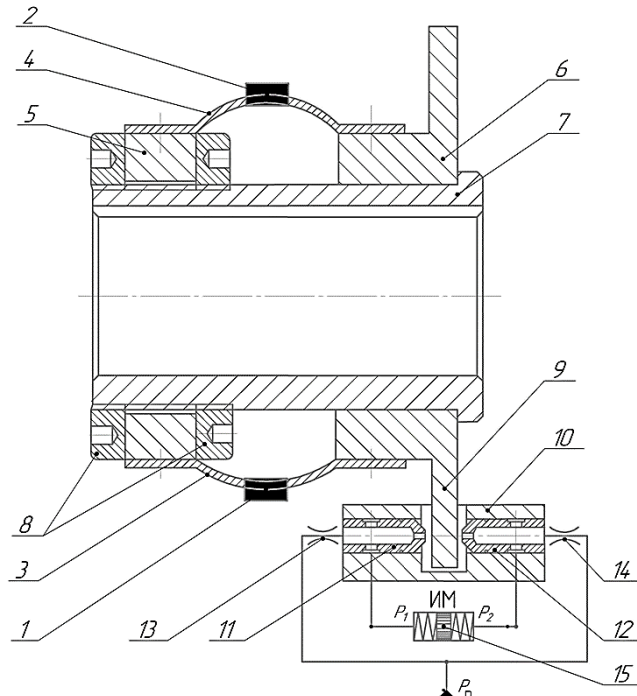


Рис. 5. Измерительный преобразователь угловой скорости с инерционными грузами и элементами сопло-заслонка: 1, 2 – инерционные грузы; 3, 4 – упругие элементы; 5 – неподвижная втулка; 6 – подвижная втулка; 7 – ступица; 8 – регулировочные гайки; 9 – фланец; 10 – неподвижный кронштейн; 11, 12 – сопла; 13, 14 – постоянные дроссели; 15 – исполнительный механизм /

Fig. 5. Angular velocity transducer with inertial weights and nozzle-flap elements: 1, 2 – inertial weights; 3, 4 – elastic elements; 5 – fixed sleeve; 6 – movable sleeve; 7 – hub; 8 – adjusting nuts; 9 – flange; 10 – fixed bracket; 11, 12 – nozzles; 13, 14 – permanent throttles; 15 – actuator

Предварительная настройка измерительного преобразователя включает в себя два этапа. Оба этапа настройки преобразователя выполняются при неработающем приводе обору-дования, когда подвижная втулка с фланцем находится в крайнем правом положении и при-жата упругими элементами к бурту ступицы.

Первый этап настройки предусматривает регулировку положения сопл в кронштейне для настройки одинаковых зазоров между торцами сопл и фланцем подвижной втулки, для чего используют резьбовые соединения сопл с кронштейном. В результате регулировки давления P_1 и P_2 жидкости в линиях управления исполнительного механизма должны быть одинаковыми. Регулировка зазоров для прохода рабочей жидкости между торцами сопл и фланцем обеспечивает настройку преобразователя на заданный диапазон измерения угловой скорости.

Второй этап настройки предусматривает предварительную деформацию упругих элементов, которая настраивается регулировочными гайками, определяющими положение неподвижной втулки на ступице, в зависимости от заданного диапазона измерения угловой скорости.

Измерительный преобразователь угловой скорости работает следующим образом. При вращении механической части преобразователя, соединенной через ступицу с валом привода контролируемого объекта, возникают центробежные силы инерции, которые воздействуют на грузы, закрепленные на упругих элементах, и заставляют их перемещаться радиально от оси вращения. Упругие элементы деформируются на величину, пропорциональную центробежной силе. Деформация упругих элементов приводит к соответствующему перемещению влево подвижной втулки с фланцем.

Фланец подвижной втулки, являющийся заслонкой и расположенный между соплами формирователя выходного сигнала, изменяет зазоры для прохода рабочей жидкости. Зазор между торцом сопла 11 и фланцем уменьшается, а зазор между торцом сопла 12 и фланцем увеличивается. Сопротивление течению жидкости из сопла 11 увеличивается, а из сопла 12 уменьшается, что приводит к изменению давлений в междроссельных камерах сопл и линиях управления исполнительным механизмом. Давление P_1 возрастает, а давление P_2 уменьшается. Возникающая разность давлений (перепад) используется как управляющий сигнал на

входах исполнительного механизма, например, автоматического регулятора адаптивной системы управления гидравлическим приводом машины.

Недостатком данной конструкции является необходимость размещать измерительный преобразователь в закрытых элементах типа коробки скоростей и т. п.

Результаты и их обсуждение. Расчет статической характеристики измерительного преобразователя угловой скорости. Расчет статической характеристики измерительного преобразователя угловой скорости выполняется на примере конструкции, изображенной на рисунке 2, т. к. она является наиболее универсальной по способам применения.

При расчетах сделаны следующие общепринятые допущения: рабочая жидкость считается несжимаемой; утечки рабочей жидкости в подвижных соединениях отсутствуют; давление питания задано и остается постоянным; проливочные характеристики сопл с заслонкой, дросселей с постоянным проходным сечением и усилия на заслонке известны; потери давления в соединительных гидравлических линиях и на нерегулируемых участках сопла отсутствуют; давление жидкости на сливе преобразователя равно атмосферному; температура рабочей жидкости постоянна; течение жидкости в сопротивлениях турбулентное, то есть коэффициенты расхода постоянные.

Статическая характеристика измерительного преобразователя угловой скорости устанавливает связь между входным (угловая скорость ω) и выходным (перепад давлений $\Delta p_{ип}$ в междроссельных камерах) параметрами в установившемся режиме:

$$\Delta p_{ип} = f(\omega). \quad (1)$$

В рассматриваемом преобразователе (рис. 1) чувствительным элементом является инерционная заслонка. Поэтому для определения статической характеристики преобразователя необходимо получить закон перемещения заслонки в установившемся режиме от угловой скорости контролируемого объекта.

Структурная схема измерительного преобразователя угловой скорости представлена на рисунке 6.

Перемещение заслонки определяется не только центробежной силой и силами центрирующих пружин, но и усилием, создаваемым жидкостью, вытекающей из сопл, а также силой трения между заслонкой и корпусом.

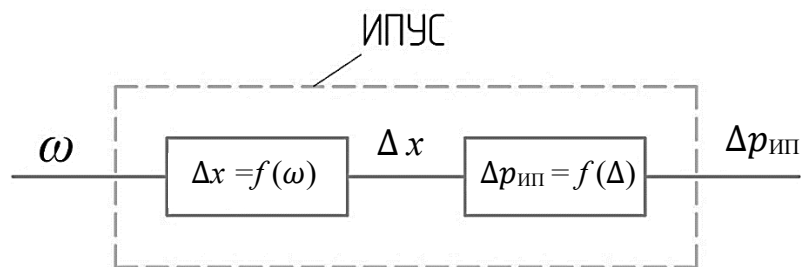


Рис. 6. Структурная схема измерительного преобразователя угловой скорости /
Fig. 6. Structural diagram of the angular velocity transducer

При равновесии сил на управляющей заслонке:

$$F_{\text{и}} = F_{\text{пр}} + F_{\text{г}} + F_{\text{тр}}, \quad (2)$$

где $F_{\text{и}}$ – центробежная сила инерции; $F_{\text{и}} = m\omega^2 e$; $F_{\text{пр}}$ – усилие от действия центрирующих пружин; $F_{\text{г}}$ – усилие, создаваемое жидкостью на заслонке, расположенной между двумя соплами; $F_{\text{тр}}$ – сила сухого трения. Силой вязкого (жидкостного) трения пренебрегаем, так как при установившемся режиме работы преобразователя скорость движения заслонки равна нулю.

Сделаем допущение, что перемещение управляющей заслонки мало, а усилие, создаваемое потоком жидкости, пропорционально лишь перепаду давлений в междроссельных камерах.

Запишем выражение (3), которое представляет собой регулировочную характеристику по давлению $\Delta p_{\text{ип}}(x)$ измерительного преобразователя (рис. 1) и показывает зависимость перепада давлений в междроссельных камерах от смещения заслонки при ее поступательном движении вдоль оси сопл [19]:

$$\Delta p_{\text{ип}} = p_1 - p_2 = p_{\text{п}} \left[\frac{a_5^2}{a_5^2 + b_2^2(x_0 + x)^2} - \frac{a_6^2}{a_6^2 + b_3^2(x_0 - x)^2} \right], \quad (3)$$

$$a_5 = a_6 = \mu_{\text{др}} \frac{\pi d_{\text{др}}^2}{4} \sqrt{\frac{2}{\rho}}, \quad (4)$$

$$b_2 = b_3 = \mu_{\text{с}} \pi d_{\text{с}} \sqrt{\frac{2}{\rho}}, \quad (5)$$

где p_1, p_2 – давление в междроссельных камерах измерительного преобразователя угловой скорости; $p_{\text{п}}$ – давление питания измерительного преобразователя угловой скорости; a_5, a_6 – гидравлические проводимости постоянных дросселей типа шайба; b_2, b_3 – относительные гидравлические проводимости переменных дросселей сопло-заслонка; $x_0 \pm x$ – текущее изменение зазора между соплом и заслонкой; $\mu_{\text{др}}$ – коэффициент расхода постоянного дросселя; $\mu_{\text{с}}$ – коэффициент расхода элемента

сопло-заслонка; $d_{\text{др}}, d_{\text{с}}$ – диаметры отверстий постоянного дросселя типа шайба и сопла; ρ – плотность жидкости.

Уравнение (3) нелинейно относительно $\Delta x = x_0 \pm x$. Воспользуемся его линейным приближением:

$$\Delta p_{\text{ип}} = \left(\frac{\partial \Delta p_{\text{ип}}}{\partial \Delta x} \right)_{\Delta x=0} \Delta x, \quad (6)$$

где $\left(\frac{\partial \Delta p_{\text{ип}}}{\partial \Delta x} \right)_{\Delta x=0} = (k_{\text{рх}})_{\Delta x=0}$ – коэффициент усиления преобразователя по давлению.

Для приближенного расчета силового воздействия потока на заслонку на практике обычно пользуются формулой, которая применима в основном к соплам с соотношением диаметров $d_{\text{т}}/d_{\text{с}} = 1,2$, где $d_{\text{т}}$ – диаметр торца сопла; $d_{\text{с}}$ – диаметр отверстия сопла [20]:

$$F_{\text{г}} = \frac{\pi d_{\text{с}}^2}{4} \Delta p_{\text{ип}}, \quad (7)$$

где $\Delta p_{\text{ип}}$ – перепад давлений в диагонали моста.

Линеаризованная характеристика может быть представлена в виде:

$$F_{\text{г}} = S_{\text{с}} k_{\text{рх}} \pi d_{\text{с}} \Delta x, \quad (8)$$

где $S_{\text{с}}$ – эффективная площадь отверстия сопла.

Усилие, развиваемое центрирующими пружинами преобразователя при их линейных характеристиках:

$$F_{\text{пр}} = c_{\text{пр}} \Delta x, \quad (9)$$

где $c_{\text{пр}}$ – суммарная жесткость центрирующих пружин преобразователя.

Сила сухого трения заслонки о стенки корпуса возникает вследствие радиальной неуравновешенности сил, действующих на заслонку, в результате несоосного расположения заслонки относительно корпуса, а также неправильности геометрических форм заслонки и отверстия в корпусе:

$$F_{\text{тр}} = K d l p_{\text{max}} f, \quad (10)$$

где $K = 0,15 \dots 0,30$ – коэффициент, характеризующий точность изготовления заслонки и корпуса; d – диаметр заслонки; l – длина,

на которой может действовать одностороннее давление; p_{max} – максимальное давление под торцами заслонки; f – коэффициент трения заслонки о стенки корпуса.

Тогда с учетом выражений (8) – (10) и элементарных преобразований, уравнение (2) примет вид:

$$m\omega^2 e = (c_{np} + S_c k_p \pi d_c) \Delta x + F_{тр}. \quad (11)$$

Из выражения (11) получим линейное приближение статической характеристики, связывающей входное угловое ускорение и перемещение управляющей заслонки:

$$\Delta x = \frac{m\omega^2 e - F_{тр}}{c_{np} + S_c k_p \pi d_c} = \omega^2 e K_{п1} - K_{п2}, \quad (12)$$

где $K_{п1}$ и $K_{п2}$ – коэффициенты передачи.

Для получения статической характеристики инерционного измерительного преобразователя вида (1) необходимо уравнение (12) подставить в выражение (3). В результате такого преобразования получим:

$$\Delta p_{ип} = \left(\frac{1}{1 + \left(1 - \frac{\omega^2 e K_{п1} - K_{п2}}{x_0}\right)^2} - \frac{1}{1 + \left(1 + \frac{\omega^2 e K_{п1} - K_{п2}}{x_0}\right)^2} \right) P_{п}. \quad (13)$$

Выражение (13) представляет собой статическую характеристику преобразователя угловых скоростей, связывающую внешнее возмущающее воздействие (угловую скорость) и перепад давлений в междроссельных камерах в установившемся режиме работы.

Рекомендации по выбору конструктивных параметров измерительных преобразователей с элементами сопло-заслонка. На основе теоретических и экспериментальных исследований, проведенных авторами [21, 22, 23], установлено, что при проектировании измерительных преобразователей сопло-заслонка

предпочтительны следующие соотношения конструктивных параметров устройства:

- постоянное сопротивление дросселя шайба

$$0,5 \text{ мм} < d_{др} < 1,5 \text{ мм}; \frac{d_{др}}{D} < 0,1;$$

$$l_{др} < d_{др}; \quad \xi = 1,5; \quad \mu = 0,8;$$

- переменное сопротивление сопло-заслонка

$$0,5 \text{ мм} < d_c < 1,5 \text{ мм}; 1,2 d_c < d_t < 1,5 d_c;$$

$$d_c < l_c < 2 d_c; L_3 = 3 d_c; \quad 0 < x < 0,1 d_c;$$

$$60^\circ < \theta < 90^\circ; 1 < \xi < 1,5; \quad \mu = 0,7 \dots 0,8.$$

Следует отметить, что при диаметрах отверстий постоянного дросселя $d_{др}$ и сопла d_c меньше 0,5 мм, а также при $x_0 - x < 0,02$ мм возможно возникновение облитерации, то есть зарастивание проходных сечений сопротивлений поляризованными молекулами жидкости, что нарушает работоспособность измерительного преобразователя угловых скоростей.

Выводы. Многочисленные теоретические и экспериментальные исследования подтверждают актуальность применения измерительных преобразователей различного назначения, в том числе устройства на базе гидравлического усилителя сопло-заслонка.

Полученное выражение статической характеристики предложенной конструкции измерительного преобразователя угловой скорости с инерционной заслонкой и соплами позволяет определить конструктивные параметры его элементов и на их основе динамические характеристики.

Рекомендуемые параметры элементов ИПУС следующие: диаметр отверстия сопла в интервале 0,5–1,5 мм, диаметр торца сопла в интервале 1,2–1,5 диаметра отверстия сопла, ход заслонки до 0,1 диаметра отверстия сопла.

Список литературы

1. Chetverikova I., Popikov P., Glushkov S. Improving the efficiency of manipulator-type machines with an improved hydraulic drive. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021;875(1):012055. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/875/1/012055>
2. Glushkov S., Popikov P., Chetverikova I., Druchinin D. Reduction of dynamic loads on the hydraulic drive of forest boom lifter. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020;595(1):012023. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/595/1/012023>
3. Lagerev A. V., Tarichko V. I., Lagerev I. A. Modeling of hydrodynamic and kinematic processes during the operation of a mobile cargo rope complex. Journal of Physics: Conference Series. 2021;1753(1):012022. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1753/1/012022>
4. Kumar M., Naik S. M., Rahul D., Kumar S. N. S. S. Design modification in hydraulic puller for increased efficiency for dismantling TTC coupling. AIP Conference Proceedings. 2021;2358(1):050019. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0058136>

5. Mitov A., Slavov T., Krlev J. Robustness Analysis of an Electrohydraulic Steering Control System Based on the Estim-at-ed Uncertainty Model. Information (Switzer-land). 2021;12(12):512.
DOI: <https://doi.org/10.3390/info12120512>
6. Sokolov V., Krol O., Stepanova O. Automatic control system for electrohydraulic drive of production equip-ment. Russian Internet Journal of Industrial Engineering. 2018;6(2):8501609.
URL: <https://journals.i-publ.ru/index.php/IndEng/article/view/2852>
7. Yan X., Chen B. Analysis of a novel automatic control approach for the free forging hammer. Applied Sciences. 2020;10(24):9127. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10249127>
8. Medvedev Y. A., Kuznetsov V. P. Dynamics of a Multimotor Electrohydraulic Drive in an Automatic Control System. Russian Engineering Research. 2011;31(6):527–538.
URL: <https://link.springer.com/article/10.3103/S1068798X11060165>
9. Neyezhnikov P., Zakharov I. Determination of the time constant of measuring transducers. Measurement: Sensors. 2021;18:100278. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measen.2021.100278>
10. Rybaczuk D. Application of the mems accelerometer as the position sensor in linear electrohydraulic drive. Sensors. 2021;21(4):1479. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21041479>
11. Lytviak O., Komar S., Derevyanko O., Duriev V. Devising quality control criteria for manufacturing control valves of the type «Nozzle-Flap». Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021;1/1(109):12–34.
URL: <https://zenodo.org/records/4772583>
12. Корнюшенко С. И. Гидроусилители типа «сопло-заслонка» и «струйная трубка». СТТ: Строительная техника и технологии. 2015;(7(115)):76–79. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25675609> EDN: VPWISF
13. Ермишин А. В. Исследование влияния давления питания на работу электрогидравлического усилителя типа сопло-заслонка. Гидравлика. 2023;(20):115–124.
Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54829568> EDN: VVZXXF
14. Очкур Г. В. Расчет динамической характеристики электрогидравлического преобразователя типа сопло-заслонка для модернизации системы управления топливоподачей двигателя автомобиля. Вестник Брянского государственного технического университета. 2020;(5(90)):32–38.
DOI: <https://doi.org/10.30987/1999-8775-2020-5-32-38> EDN: FXMFEW
15. Авроров В. А., Мурашкина О. А., Сарафанкина Е. А. Определение величины прогиба оси ротора диспергатора численными методами. XXI век: Итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2022;11(2):55–58.
DOI: <https://doi.org/10.46548/21vek-2022-1158-0009> EDN: XDQAVQ
16. Овтов В. А., Орехов А. А., Поликанов А. В., Чиркова Н. С., Фролов Д. А., Колдаев Н. Н., Костромитин А. С., Девликамов Р. И. Моделирование напряженно-деформированного состояния вала роторного лопастного ориентирующего устройства. Нива Поволжья. 2022;(3(63)):3001.
DOI: <https://doi.org/10.36461/NP.2022.63.3.003> EDN: IYOZWW
17. Мачнев А. В., Мачнев В. А., Мачнева О. Ю., Быков А. В., Шилина В. Д., Черняев Д. О. Теоретическое обоснование трехлопастного ротационного питателя. Нива Поволжья. 2022;(2(62)):3002.
DOI: <https://doi.org/10.36461/NP.2022.62.2.005> EDN: RMJIZI
18. Симанин Н. А., Голубовский В. В. Измерительный преобразователь угловой скорости: пат на полезную модель №188919 Российская Федерация. № 2018147346; заявл. 27.12.2018; опубл. 29.04.2019. Бюл. № 13. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38146615> EDN: BUJPK
19. Симанин Н. А., Голубовский В. В. Проектирование элементов и систем автоматического регулирования гидравлических приводов технологического оборудования: монография. Пенза: Пензенский государственный технологический университет, 2015. 180 с.
20. Урекин В. С., Истомина Ю. В. Разработка гидравлических систем автоматического управления приводами технологического оборудования. Инновации технических решений в машиностроении и транспорте: сб. ст. II Всеросс. науч.-техн. конф. для молодых ученых и студентов с международным участием, Пенза, 15–17 апреля 2016 года. Пенза: Пензенская государственная сельскохозяйственная академия, 2016. С. 259–262. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26518376> EDN: WIHVRJ
21. Golubovsky V., Konovalov V., Doncova M. Modeling static characteristics of angular velocity measuring transducer of the "nozzle-damper" type. Journal of Physics: Conference Series. 2020;1614:012084.
DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1614/1/012084>
22. Golubovsky V., Konovalov V., Doncova M. Modelling the force action of a liquid on the shutter of a measuring transducer. E3S Web of Conferences. Key Trends in Transportation Innovation (KTTI 2019). 2020;157:02007.
DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015702007>
23. Golubovsky V., Konovalov V., Doncova M. Influence of flapper-nozzle transducer parameters on the flow rate amplification factor. Transportation Research Procedi. 2022;63:853–858.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.082>
-

References

1. Chetverikova I., Popikov P., Glushkov S. Improving the efficiency of manipulator-type machines with an improved hydraulic drive. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021;875(1):012055. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/875/1/012055>
2. Glushkov S., Popikov P., Chetverikova I., Druchinin D. Reduction of dynamic loads on the hydraulic drive of forest boom lifter. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020;595(1):012023. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/595/1/012023>
3. Lagerev A. V., Tarichko V. I., Lagerev I. A. Modeling of hydrodynamic and kinematic processes during the operation of a mobile cargo rope complex. Journal of Physics: Conference Series. 2021;1753(1):012022. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1753/1/012022>
4. Kumar M., Naik S. M., Rahul D., Kumar S. N. S. S. Design modification in hydraulic puller for increased efficiency for dismounting TTC coupling. AIP Conference Proceedings. 2021;2358(1):050019. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0058136>
5. Mitov A., Slavov T., Králev J. Robustness Analysis of an Electrohydraulic Steering Control System Based on the Estimated Uncertainty Model. Information (Switzerland). 2021;12(12):512. DOI: <https://doi.org/10.3390/info12120512>
6. Sokolov V., Krol O., Stepanova O. Automatic control system for electrohydraulic drive of production equipment. Russian Internet Journal of Industrial Engineering. 2018;6(2):8501609. URL: <https://journals.i-publ.ru/index.php/IndEng/article/view/2852>
7. Yan X., Chen B. Analysis of a novel automatic control approach for the free forging hammer. Applied Sciences. 2020;10(24):9127. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10249127>
8. Medvedev Y. A., Kuznetsov V. P. Dynamics of a Multimotor Electrohydraulic Drive in an Automatic Control System. Russian Engineering Research. 2011;31(6):527–538. URL: <https://link.springer.com/article/10.3103/S1068798X11060165>
9. Neyezhnikov P., Zakharov I. Determination of the time constant of measuring transducers. Measurement: Sensors. 2021;18:100278. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measen.2021.100278>
10. Rybarczyk D. Application of the mems accelerometer as the position sensor in linear electrohydraulic drive. Sensors. 2021;21(4):1479. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21041479>
11. Lytviak O., Komar S., Derevyanko O., Durieiev V. Devising quality control criteria for manufacturing control valves of the type «Nozzle-Flap». Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021;1/1(109):12–34. URL: <https://zenodo.org/records/4772583>
12. Korniyushenko S. I. Hydraulic amplifiers of the "nozzle-flap" and "jet tube" type. *STT: Stroitel'naya tekhnika i tekhnologii* = Construction Equipment and Technologies. 2015;(7(115)):76–79. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25675609>
13. Ermishin A. V. Investigation of the effect of supply pressure on the operation of an electrohydraulic nozzle-flap type amplifier. *Gidravlika*. 2023;(20):115–124. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54829568>
14. Ochkur G. V. Dynamic characteristics calculation for electro-hydraulic converter of nozzle-flap type for modernization of system for motor-car fuel feeding control. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Bulletin of Bryansk state technical university. 2020;(5(90)):32–38. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30987/1999-8775-2020-5-32-38>
15. Avrorov V. A., Murashkina O. A., Sarafankina E. A. Determination of the deflection value of the rotor axis of a high-speed dispersant by numerical methods. *XXI vek: Itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus* = XXI Century: Resumes of the Past and Challenges of the Present plus. 2022;11(2):55–58. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.46548/21vek-2022-1158-0009>
16. Ovtov V. A., Orekhov A. A., Polikanov A. V., Chirkova N. S., Frolov D. A., Koldaev N. N., Kostromitin A. S., Devlikamov R. I. Modelling the stress-strain state of the rotary paddle orienting device shaft. *Niva Povolzh'ya* = Volga Region Farmland. 2022;(3(63)):3001. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.36461/NP.2022.63.3.003>
17. Machnev A. V., Machnev V. A., Machneva O. Yu., Bykov A. V., Shilina V. D., Chernyaev D. O. Theoretical substantiation of three-blade rotary feeder. *Niva Povolzh'ya* = Volga Region Farmland. 2022;(2(62)):3002. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.36461/NP.2022.62.2.005>
18. Simanin N. A., Golubovskiy V. V. Angular velocity measuring converter: pat for a utility model RF. No. 188919. 2019. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38146615>
19. Simanin N. A., Golubovskiy V. V. Design of elements and systems of automatic control of hydraulic drives of technological equipment: monograph. Penza: *Penzenskiy gosudarstvennyy tekhnologicheskii universitet*, 2015. 180 p.
20. Urekin V. S., Istomina Yu. V. Development of hydraulic automatic control system drives technological equipment. Innovations of technical solutions in mechanical engineering and transport: collection of articles of the II All-Russian Scientific and Technical Conference for Young Scientists and Students with international participation, Penza, April 15-17, 2016. Penza: *Penzenskaya gosudarstvennaya sel'skokhozyaystvennaya akademiya*, 2016. pp. 259–262. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26518376>

21. Golubovsky V., Konovalov V., Doncova M. Modeling static characteristics of angular velocity measuring transducer of the "nozzle-damper" type. Journal of Physics: Conference Series. 2020;1614:012084.

DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1614/1/012084>

22. Golubovsky V., Konovalov V., Doncova M. Modelling the force action of a liquid on the shutter of a measuring transducer. E3S Web of Conferences. Key Trends in Transportation Innovation (KTTI 2019). 2020;157:02007.

DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015702007>

23. Golubovsky V., Konovalov V., Doncova M. Influence of flapper-nozzle transducer parameters on the flow rate amplification factor. Transportation Research Procedi. 2022;63:853–858.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.082>

Сведения об авторах

Голубовский Виталий Вадимович, кандидат техн. наук, доцент, зав. кафедрой «Технология машиностроения», ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет», пр. Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11, г. Пенза, Российская Федерация, 440039, e-mail: prk@penzgtu.ru,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3952-187X>

Симанин Николай Алексеевич, кандидат техн. наук, профессор, кафедра «Технология машиностроения», ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет», г. Пенза, пр. Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11, Российская Федерация, 440039, e-mail: prk@penzgtu.ru,

✉ **Коновалов Владимир Викторович**, доктор техн. наук, профессор, кафедра «Технология машиностроения», ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет», г. Пенза, пр. Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11, Российская Федерация, 440039, e-mail: prk@penzgtu.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5011-5354>, e-mail: konovalov-penza@rambler.ru

Information about the authors

Vitaly V. Golubovsky, PhD in Engineering, associate professor, Head of the Department «Machine Building Technology», Penza State State Technological University, Baidukova Ave/Gagarina St., 1a/11, Penza, Russian Federation, 440039, e-mail: prk@penzgtu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3952-187X>

Nikolay A. Simanin, PhD in Engineering, professor, Department «Machine Building Technology», Penza State Technological University, Penza, Baidukova Ave/Gagarina St., 1a/11, Russian Federation, 440039, e-mail: prk@penzgtu.ru

✉ **Vladimir V. Konovalov**, DSc in Engineering, professor, Department «Machine Building Technology», Penza State Technological University, Penza, Baidukov Ave/Gagarina St., 1a/11, Russian Federation, 440039, e-mail: prk@penzgtu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5011-5354>, e-mail: konovalov-penza@rambler.ru

✉ – Для контактов / Corresponding author

Прогнозное распределение технологий переработки навоза КРС в Российской Федерации

© 2024. А. Ю. Брюханов, Е. В. Шалавина[✉], Э. В. Васильев

Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Для расчета эмиссии метана и закиси азота в животноводстве необходимо знать характеристики получаемого навоза и систем его переработки для каждого типа хозяйств и региона в целом. Цель исследования – определить процентное соотношение технологий переработки навоза крупного рогатого скота (КРС) в различных природно-климатических условиях Российской Федерации с учетом типа образующегося на предприятии навоза для уточнения коэффициента выбросов парниковых газов. При обследовании комплексов КРС было установлено количество получаемого навоза с разбивкой по влажности и объемам размещения в хранилищах; рассчитана масса перерабатываемого навоза в соответствии с применяемыми технологиями переработки; собрана информация по типам систем сбора и хранения навоза, выявлено их соотношение по федеральным округам (более подробно – по субъектам с большим поголовьем молочного скота). Полученные соотношения позволили скорректировать коэффициент, который необходим для расчета эмиссии метана и закиси азота. Он отражает долю выделенного азота, который обрабатывается/перерабатывается в рамках определенной технологии. На основе уточненного значения коэффициента и по методике Межправительственной группы экспертов по изменению климата были рассчитаны эмиссии для коров и КРС (без коров) для Северо-Западного федерального округа (СЗФО), в котором наблюдалось наибольшее отличие между показателями из Национального кадастра и полученными в исследовании данными. В СЗФО прямой выброс закиси азота и метана в пересчете на CO₂ эквивалент по данным кадастра (2021 г.) составил 180,7 тысяч тонн в год; при расчете на основании базового распределения технологий (2021 г.) – 388,7 тысяч тонн в год; при расчете на основании прогнозного распределения технологий (2025 г.) – 375,8 тысяч тонн в год. Результаты исследования показали, что существующая тенденция по модернизации технологий переработки навоза в сторону наиболее экологических и соответствующих принципам наилучших доступных технологий ведет к снижению эмиссии парниковых газов.

Ключевые слова: эмиссии метана, эмиссии закиси азота, побочные продукты животноводства, технологии переработки, экология

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (тема № FGUN-2022-0010).

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Брюханов А. Ю., Шалавина Е. В., Васильев Э. В. Прогнозное распределение технологий переработки навоза КРС в Российской Федерации. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2024;25(3):507–517.

DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.3.507-517>

Поступила: 07.02.2024

Принята к публикации: 17.05.2024

Опубликована онлайн: 26.06.2024

Forecast distribution of cattle manure processing technologies in the Russian Federation

© 2024. Aleksandr Yu. Briukhanov, Ekaterina V. Shalavina[✉], Eduard V. Vasilev

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

To calculate methane and nitrous oxide emissions in livestock farming requires the characteristics of produced manure and its treatment systems per a single farm and the whole region. The study aim is to specify the percentage of cattle manure processing technologies in different natural and climatic conditions of the Russian Federation and to revise the emission factor of greenhouse gases. The survey of cattle complexes established the type and amount of manure produced with a breakdown by moisture content and storage volumes. The study calculated the mass of manure processed according to the applied processing technologies. The study acquired the data on the types of manure collection and storage systems and revealed their ratio by federal districts, in more detail – in the federal subjects with bigger stock of dairy cattle. The obtained ratios allowed adjusting the coefficient required to calculate methane and nitrous oxide emissions. The coefficient reflected the share of emitted nitrogen treated or processed by a certain technology. The study calculated the emissions for cows and cattle (without cows) with the use of the adjusted coefficient and the methods of the Intergovernmental Panel on Climate Change for the Northwestern Federal District, which featured the greatest difference between the indicators from the National Inventory and the data obtained in the study. Direct nitrous oxide and methane emission in this District in terms of CO₂-eq. according to the Inventory data (2021) was 180.7 thousand t/year; when calculated by the basic distribution of technologies (2021) – 388.7 thousand t/year; when calculated by the forecast distribution of technologies (2025) – 375.8 thousand t/year. The study results demonstrated that the

current tendency to upgrading the manure processing technologies towards the most environmentally friendly and compliant with the principles of best available techniques resulted in reduction in greenhouse gas emissions.

Keywords: methane emission, nitrogen oxide emission, animal by-products, processing technology, ecology

Acknowledgements: the research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under the state assignment of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM (theme No. FGUN-2022-0010).

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

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

For citations: Briukhanov A. Yu., Shalavina E. V., Vasilev E. V. Forecast distribution of cattle manure processing technologies in the Russian Federation. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2024;25(3):507–517. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.3.507-517>

Received: 07.02.2024

Accepted for publication: 17.05.2024

Published online: 26.06.2024

В соответствии с Методическими рекомендациями по проведению добровольной инвентаризации объема выбросов парниковых газов в субъектах Российской Федерации¹ основными исходными данными для расчета эмиссий являются поголовье животных N_T и показатель «доля суммарного годового выделения азота для каждого вида скота T , которая обрабатывается в рамках системы S сбора и хранения навоза в данном регионе» $MS_{(T,S)}$ (не имеет размерности). Значения указанных исходных данных являются основополагающими как при расчете эмиссий N_2O , так и при расчете эмиссий CH_4 в системе переработки навоза крупного рогатого скота (КРС).

Процентное распределение технологий переработки навоза и помета по зонам Российской Федерации является составной частью показателя $MS_{(T,S)}$. Следовательно, получив прогнозные значения данного показателя для различных природно-климатических условий Российской Федерации, возможно уточнение коэффициентов выбросов парниковых газов и повышение точности информации, подаваемой в Национальный кадастр антропогенных выбросов². Прогнозные значения определяли на основе заложенных показателей интенсификации отрасли крупного рогатого скота и базового распределения технологий [1].

В соответствии с показателями продовольственной безопасности и индикаторами их оценки, отраженными в Доктрине продовольственной безопасности Российской Федерации³, уровень самообеспечения молоком и молокопродуктами (в пересчете на молоко) должен быть не менее 90 %. Эта цифра говорит

о продолжении интенсификации отрасли молочного животноводства. Исследования учёных из разных регионов РФ подтверждают данное заключение и предлагают пути решения проблемы образования больших объемов навоза и снижения эмиссии парниковых газов. Ряд ученых отмечают необходимость комплексной переработки навоза, включающей использование полей орошения [2]; снижение стоков с преддоильных площадок, перекачивающихся совместно с жидким навозом в приемный резервуар [3]; экологическое использование получаемого органического удобрения [4, 5]. Опыт использования органического удобрения в Белгородской области показал, что превышение дозы внесения жидкого органического удобрения более 100 тонн на 1 гектар приводит к засолению почвы и превышению содержания в ней химических элементов [6]. Исследования, направленные на анализ технологических решений переработки навоза в удобрение, показали, что обоснованные режимы работы и грамотный выбор оборудования снижает потери питательных веществ, что приводит к сокращению эмиссии парниковых газов [7, 8]. Для экологичного функционирования животноводческих комплексов также необходимо на стадии проектирования учитывать объемы образуемых твердого и жидкого навоза, а также предусматривать необходимую площадь земельных угодий для внесения получаемого удобрения. При таком подходе будут решены такие экологические проблемы, как закисление почв, загрязнение грунтовых вод, загрязняющий атмосферу выброс парниковых газов [9, 10, 11].

¹Распоряжение Минприроды России от 16.04.2015 N 15-р «Об утверждении методических рекомендаций по проведению добровольной инвентаризации объема выбросов парниковых газов в субъектах Российской Федерации». [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/420278225?ysclid=lwachmmmk358876676> (дата обращения: 31.01.2024)

²Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990-2021 гг. М.: Росгидромет, ФГБУ «ИГКЭ». 2023. 479 с. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=53434805>

³Указ президента Российской Федерации от 21 января 2020 года N 20 «Об утверждении Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации». [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/564161398> (дата обращения: 31.01.2024)

Подобные исследования также проводились и зарубежными коллегами. Ученые из Польши считают, что снижение эмиссии парниковых газов должно происходить за счет модернизации отрасли сельского хозяйства, а не за счет снижения интенсификации производства [12]. Исследования, проведенные в Сербии по мониторингу эмиссии парниковых газов от систем переработки различного типа навоза (твердый и жидкий), показали, что более 12 % всех эмиссий поступают от комплексов с переработкой жидкого навоза КРС и поголовьем более 1000 голов [13]. На эмиссии парниковых газов от навоза также влияют кормовые добавки, добавляемые в рацион [14] и плотность перерабатываемого навоза [16]. Датские ученые провели исследования эмиссии парниковых газов от 4 технологий переработки жидкого навоза. Анаэробное сбраживание показало наилучший результат, однако стоимость реализации данного технологического решения была самой высокой [17]. Исследования, проведенные в Китае по анализу эмиссии парниковых газов от твердого навоза, показали, что на величину эмиссии оказывает сильное значение содержание в навозе азота и углерода [18, 19].

Основными показателями интенсификации отрасли, отраженными в статистических данных, являются поголовье КРС в хозяйствах всех категорий⁴ и средний надой молока от одной коровы в сутки⁵.

Цель исследования – определить процентное соотношение технологий переработки навоза в различных природно-климатических условиях РФ с учетом типа получаемого на предприятии навоза для уточнения коэффициента выбросов парниковых газов.

Научная новизна – определение уточненного коэффициента $MS_{(T,S)}$ – доля навоза (помета птицы) от категории/подкатегории скота, которая обрабатывается с использованием определенной системы сбора и хранения навоза и помета в климатическом регионе. Данный коэффициент необходим при расчете эмиссии парниковых газов.

Материал и методы. В исследовании были рассмотрены Региональные программы развития АПК в части, касающейся предприятий КРС. В каждой Региональной программе анализировался целевой показатель с 2021 по 2025 год – производство молока за год (тысяч тонн).

Поголовье крупного рогатого скота в хозяйствах всех категорий (тысяч голов) за период с 2019 по 2022 год взято из баз данных Росстата⁶. Прогнозное поголовье крупного рогатого скота до 2025 года включительно рассчитано на основании данных Единой межведомственной информационно-статистической системы (ЕМИСС)⁷.

Данные по среднему надою молока от одной коровы в сутки за период с 2019 по 2022 год взяты из баз данных Росстата. Данные по среднему надою молока от одной коровы в сутки за период с 2022 по 2025 год включительно рассчитаны как отношение показателя производства молока за год (тысяч тонн) (статистические данные за 2022 г.) и целевого показателя из Программ развития АПК для каждого региона РФ (с 2022 по 2025 г.) к поголовью коров, взятого из статистических данных.

В исследовании рассматривали следующие типы предприятий: сельскохозяйственные организации; крестьянско-фермерские хозяйства и индивидуальные предприниматели; хозяйства населения.

Для исследования распределения технологий переработки навоза и помета все федеральные округа Российской Федерации объединены в три зоны с учетом природно-климатических особенностей: Северо-Западный федеральный округ (СЗФО) – Зона 1; Приволжский федеральный округ (ПФО), Южный федеральный округ (ЮФО), Северо-Кавказский федеральный округ (СКФО) и Центральный федеральный округ (ЦФО) – Зона 2; Уральский федеральный округ (УФО), Сибирский федеральный округ (СФО) и Дальневосточный федеральный округ (ДФО) – Зона 3.

⁴Федеральная служба государственной статистики. Паспорт показателя – Поголовье скота и птицы. [Электронный ресурс]. URL: <https://fedstat.ru/indicator/33915> (дата обращения: 09.02.2024)

⁵Федеральная служба государственной статистики. Паспорт показателя – Средний надой молока от одной коровы в сутки. [Электронный ресурс]. URL: <https://fedstat.ru/indicator/42331> (дата обращения: 09.02.2024)

⁶Федеральная служба государственной статистики Паспорт показателя – Поголовье скота и птицы в хозяйствах всех категорий. [Электронный ресурс]. URL: <https://fedstat.ru/indicator/31325> (дата обращения: 09.02.2024).

⁷Отрасль животноводства в России в 2022 году. Маркетинговые исследования рынков на основании данных ЕМИСС. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sostav.ru/blogs/247016/35804> (дата обращения: 31.01.2024).

В исследовании была рассчитана масса получаемого навоза крупного рогатого скота в соответствии с РД-АПК 1.10.15.02-17*⁸. С учетом применяемых в регионе технологий произведен расчет массы навоза, перерабатываемой в соответствии с каждой технологией переработки.

Выбросы метана CH_4 рассчитаны в соответствии с Методическими рекомендациями по проведению добровольной инвентаризации объема выбросов парниковых газов в субъектах Российской Федерации⁹ по формулам:

$$CH_4 = \sum_{(T)} \frac{(EF_{(T)} \cdot N_T)}{10^6}; \quad (1)$$

$$EF_{(T)} = (VS_{(T)} \times 365) \times \left[B_{0(T)} \times 0,67 \times \sum_{S,k} \frac{MCF_{(S,k)}}{100} \times MS_{(T,S,k)} \right], \quad (2)$$

где N_T – количество голов вида/категории скота T в регионе; $VS_{(T)}$ – суточное выделение летучего твердого вещества для заданной категории T скота, кг с. в. на 1 голову в год; 365 – основа для расчета годового производства VS , сутки/год; $B_{0(T)}$ – максимальная метанопродуцирующая способность для навоза скота категории T , м³ CH_4 на кг выделенных VS ; 0,67 – коэффициент преобразования м³ CH_4 в килограммы CH_4 , кг/м³; $MCF_{(S,k)}$ – коэффициенты преобразования метана для каждой системы S сбора и хранения навоза и помета по климатическому региону k , %; $MS_{(T,S,k)}$ – доля навоза (помета птицы) от категории/подкатегории T скота, которая обрабатывается с использованием определенной системы S сбора и хранения навоза и помета в климатическом регионе k , не имеет размерности.

Прямые выбросы закиси азота $N_2O_{D(min)}$ рассчитаны в соответствии с Методическими рекомендациями по проведению добровольной инвентаризации объема выбросов парниковых газов в субъектах Российской Федерации¹⁰ по формуле:

$$N_2O_{D(mm)} = \left[\sum_S \left[\sum_T (N_{(T)} \times Nex_{(T)} \times MS_{(T,S,k)}) \right] \times EF_{3(S)} \right] \times \frac{44}{28} \quad (3)$$

где $Nex_{(T)}$ – среднегодовое выделение азота в регионе, кг N на 1 голову в год; $EF_{3(S)}$ – коэффициент для прямых выбросов N_2O от системы

уборки, хранения и использования навоза S в регионе, кг N_2O-N на кг N в системе S ; 44/28 – коэффициент преобразования выбросов (N_2O-N) (mm) в выбросы N_2O (mm).

Расчеты проведены с использованием программного пакета Microsoft Excel.

Результаты и их обсуждение. Расчет эмиссии метана и закиси азота требует знания характеристик навоза КРС, получаемого в каждой категории хозяйств. Для этого были проанализированы технологии содержания животных на разных предприятиях для определения типа получаемого навоза (рис. 1).

Был проведен анализ поголовья крупного рогатого скота в хозяйствах всех категорий. Результаты исследования показали, что в зависимости от региона Российской Федерации меняется доля поголовья по разным типам предприятий. Кроме того, существуют крестьянско-фермерские предприятия, в которых надой достигают 8000 кг на 1 голову в год и применяются интенсивные технологии содержания животных. Поэтому наряду с поголовьем животных была проанализирована продуктивность коров в каждом регионе РФ для каждого типа предприятий.

По прогнозу к 2025 году (расчетное значение) по отношению к 2019 году (статистическое значение) поголовье КРС в Зоне 1 (СЗФО) увеличится на 1,1 % – с 734,3 до 742,5 тысяч голов, в Зоне 2 (ЦФО, ЮФО, ПФО и СКФО) увеличится на 1,2 % – с 12416,2 до 12568,3 тысяч голов, в Зоне 3 (СФО, УФО и ДФО) уменьшится на 3,9 % – с 5053,3 до 4854,6 тысяч голов.

Согласно программам развития АПК планируется увеличить средние надой молока по регионам Зоны 1 на 12,8 % – с 6651,4 кг на 1 голову в год (целевой показатель 2021 г.) до 7390,1 кг на 1 голову в год (целевой показатель 2025 г.), по регионам Зоны 2 – на 10,5 % – с 4743,6 кг на 1 голову в год (целевой показатель 2021 г.) до 5242,6 кг на 1 голову в год (целевой показатель 2025 г.), по регионам Зоны 3 – на 23,5 % – с 4092,9 кг на 1 голову в год (целевой показатель 2021 г.) до 5040,1 кг на 1 голову в год (целевой показатель 2025 г.).

⁸РД-АПК 1.10.15.02-17*. Методические рекомендации по технологическому проектированию систем удаления и подготовки к использованию навоза и помета. (Раздел 5, табл. 3, стр. 21). [Электронный ресурс].

URL: <https://docs.cntd.ru/document/495876346?ysclid=lselj0eg85b20610798> (дата обращения: 31.01.2024).

⁹Методические рекомендации по проведению добровольной инвентаризации объема выбросов парниковых газов в субъектах Российской Федерации. 2015. (Ч. IV, Раздел 1.4, С. 499, 505).

URL: https://prirodnadzor.admhmao.ru/upload/iblock/747/rp-16.04.2015_-15_r.pdf

¹⁰Там же (Ч. IV, Раздел 1.5, С. 519). URL: https://prirodnadzor.admhmao.ru/upload/iblock/747/rp-16.04.2015_-15_r.pdf

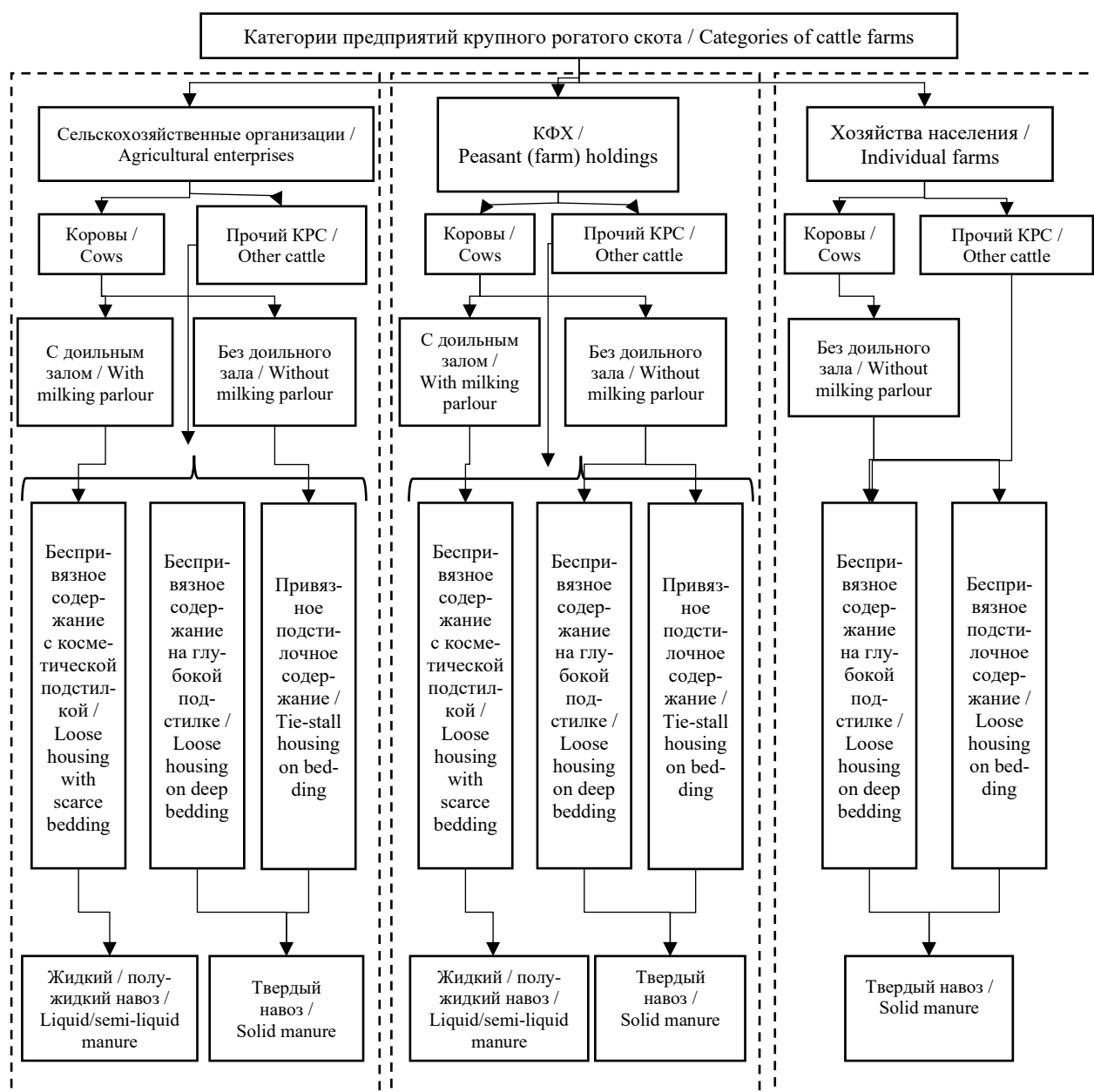


Рис. 1. Типы получаемого навоза КРС на сельскохозяйственных предприятиях разных категорий /
Fig. 1. Types of received cattle manure at agricultural enterprises of different categories

В целом во всех федеральных округах РФ при незначительном увеличении – снижении поголовья КРС продуктивность коров будет расти (в Зоне 1 – на 12,8 %, в Зоне 2 – на 10,5 %, в Зоне 3 – на 23,1 %).

В результате во всех трех зонах при незначительном увеличении поголовья КРС (до 2 % в Зонах 1 и 2) или снижении поголовья (на 3,9 % в Зоне 3) к 2025 году по целевым показателям программ АПК регионов РФ планируется дальнейшее увеличение надоев молока на 1 корову. Это говорит о продолжении интенсификации отрасли КРС – переход на беспривязное содержание животных, увеличение стоков с доильных залов и доли жидкого навоза

КРС. Следовательно, происходит переход на технологию разделения навоза на фракции с последующим длительным выдерживанием жидкой фракции и пассивным компостированием твердой. Эта технология с течением времени заменяет технологию «хранение навалом» полужидкого навоза КРС. Расчет проведен как для исходного навоза, так и для жидкой и твердой фракций навоза. Для возможности использования методик расчета Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) полученные результаты соотнесены с системами хранения навоза/помета «сухое» и «жидкое» (рис. 2).



Рис. 2. Схема соотнесения типа навоза к типу хранения / Fig. 2. Scheme for correlating the type of manure to the type of storage

Прогнозное распределение технологий переработки навоза КРС представлено на рисунке 3.
В Зоне 1 к 2025 году процент применения технологии пассивного компостирования навоза

КРС увеличится с 25,0 до 42,3 %; процент применения технологии длительного выдерживания жидкого навоза снизится с 37,0 до 16,7 %, при этом доля технологии длительного выдерживания жидкой фракции навоза возрастет с 6 до 32 %.

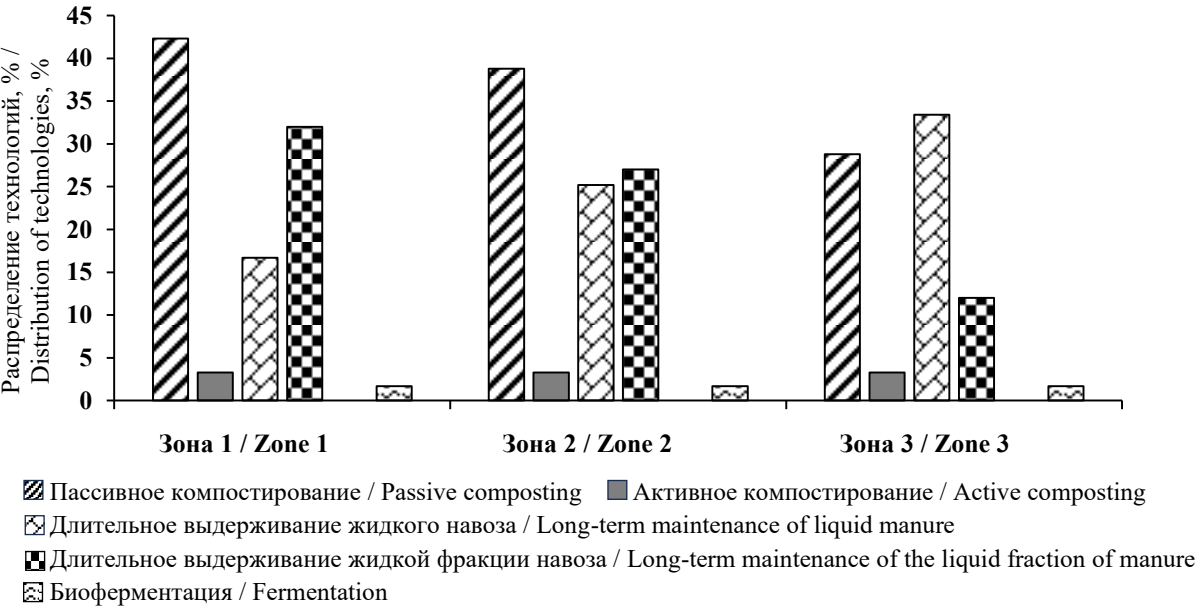


Рис. 3. Прогнозное распределение технологий переработки навоза КРС (2025 г.) / Fig. 3. Forecast distribution of cattle manure processing technologies (2025)

В Зоне 2 к 2025 году процент применения технологии пассивного компостирования навоза КРС увеличится с 25,0 до 38,8 %; процент применения технологии длительного выдерживания жидкого навоза снизится с 37,0 до 25,2 %, при этом возрастет доля технологии длительного выдерживания жидкой фракции навоза с 6 до 27 %.

В Зоне 3 к 2025 году процент применения технологии пассивного компостирования навоза КРС увеличится с 25,0 до 28,8 %; процент применения технологии длительного выдерживания жидкого навоза снизится с 37,0 до 33,4 %, при этом доля технологии длительного

выдерживания жидкой фракции навоза возрастет с 6 до 12 %.

Увеличение доли технологии пассивного компостирования навоза КРС в Зонах 1 и 2 и доли технологии сухого хранения в Зоне 3 объясняется уходом от технологии «хранение навалом», которая не может больше применяться по требованиям экологического законодательства – переработка навоза должна осуществляться только на гидроизолированных площадках.

С учетом прогнозных оценок обновлено соотношение основных технологий переработки навоза КРС¹¹. Данные представлены в таблице.

Таблица – Соотношение основных типов систем переработки навоза КРС по зонам /
Table – Ratio of main types of cattle manure treatment systems by zones

Категория животных / Animal category	Тип системы хранения навоза / Type of manure storage system				
	жидкое / liquid		сухое / dry		пастбища и выпасы / pastures and grazing lands
	кадастр / inventory	прогноз / forecast	кадастр / inventory	прогноз / forecast	кадастр/прогноз / inventory/forecast
Зона 1 (значения коэффициента MS_{TS}) / Zone 1 (values of MS_{TS} coefficient)					
Коровы / Cows	0	40,5	83,1	42,6	16,9
КРС (без коров) / Cattle (without cows)	8,2	36	65,8	38	26,0
Зона 2 (значения коэффициента MS_{TS}) / Zone 2 (values of MS_{TS} coefficient)					
Коровы / Cows	0	43,4	83,1	39,7	16,9
КРС (без коров) / Cattle (without cows)	8,2	38,6	65,8	35,4	26,0
Зона 3 (значения коэффициента MS_{TS}) / Zone 3 (values of MS_{TS} coefficient)					
Коровы / Cows	0	37,7	83,1	45,4	16,9
КРС (без коров) / Cattle (without cows)	8,2	33,6	65,8	40,4	26,0

В связи с интенсификацией отрасли молочного животноводства доля пастбищ и выпасов будет сокращаться, обеспечивая тем самым снижение эксплуатационных затрат.

Полученные соотношения технологий переработки навоза позволили скорректировать коэффициент $MS_{(T,S)}$, необходимый для расчета эмиссии метана и закиси азота.

На основе уточненного значения коэффициента и по методике МГЭИК выполнены расчеты эмиссий для коров и КРС (без коров).

Анализ полученных результатов показывает, что при делении всех возможных вариантов

технологий на две системы «сухое» и «жидкое», согласно методике МГЭИК, наибольшие отличия между данными Национального кадастра (2021 г.) и базовому распределению технологий (2021 г.) будут наблюдаться в Зоне 1 – Северо-Западном федеральном округе.

Поэтому именно для этого региона выполнен расчет базовой и прогнозной ситуаций по эмиссиям парниковых газов в пересчете на CO_2 -эквивалент. Результаты расчета эмиссии метана от систем переработки навоза КРС показаны на рисунке 4, результаты расчета эмиссии закиси азота – на рисунке 5.

¹¹Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990-2021 гг. (раздел 5, табл. 5.12, С. 197).

URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=53434805>

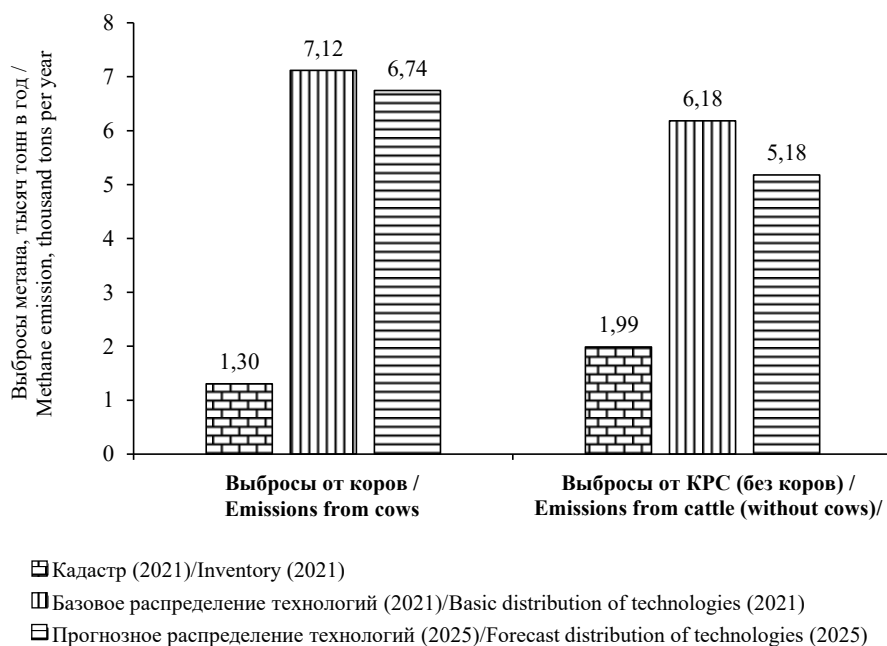


Рис. 4. Эмиссии метана от систем переработки навоза КРС в СЗФО /
Fig. 4. Methane emissions from cattle manure processing systems in North-West Federal District

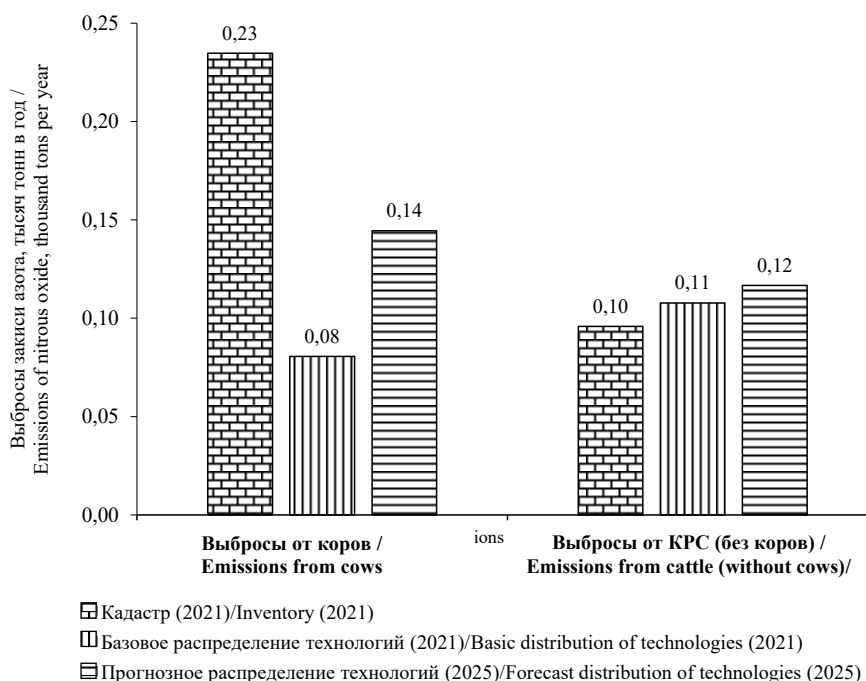


Рис. 5. Эмиссии (прямые) закиси азота от систем переработки навоза КРС в СЗФО /
Fig. 5. Nitrous oxide emissions (direct) from cattle manure processing systems in North-West Federal District

В результате расчетов для Зоны 1 установлено, что расчетные эмиссии метана от коров по данным кадастра меньше расчетных по уточненному коэффициенту $MS_{(T,S)}$ на 81 %; расчетные эмиссии метана от КРС (без коров) по данным кадастра меньше расчетных по уточненному коэффициенту $MS_{(T,S)}$ на 67 %.

В результате расчетов для Зоны 1 установлено, что расчетные эмиссии закиси азота от коров по данным кадастра больше расчетных по уточненному коэффициенту $MS_{(T,S)}$ на 65 %; расчетные эмиссии метана от КРС (без коров) по данным кадастра меньше расчетных по уточненному коэффициенту $MS_{(T,S)}$ на 9 %.

Полученные отличия объясняются тем, что по данным кадастра при переработке навоза коров доля жидкого хранения составляет 0 %, что не в полной мере соответствует фактическому распределению технологий.

При прямом выбросе в Зоне 1 закиси азота и метана в пересчете на CO₂ эквивалент по данным кадастра (2021 г.) составляет 180,7 тысяч тонн в год; при расчете на основании обновленных данных по базовому распределению технологий (2021 г.) – 388,7 тысяч тонн в год; при расчете на основании обновленных данных по прогнозируемому распределению технологий (2025 г.) – 375,8 тысяч тонн в год, то есть снижение на 12,9 тысяч тонн, или на 3,4 %.

Выводы. Обработана информация обследования комплексов крупного рогатого скота, включающая количество образующегося навоза с разбивкой по влажности и объемам размещения в хранилищах; типы систем сбора и хранения навоза и их процентное соотношение по федеральным округам (более подробно по субъектам с большим поголовьем КРС).

В целом в Российской Федерации в молочном животноводстве наблюдается тенденция к увеличению доли жидкого навоза. Это объясняется тем, что во всех трех зонах будет происходить дальнейшая интенсификация отрасли без существенного увеличения поголовья животных за счет изменения системы навозоудаления, снижающей энергоемкость процесса, и увеличения стоков с доильных залов.

С учетом полученного уточненного значения коэффициента и по методике Межправительственной группы экспертов по изменению климата выполнены расчеты эмиссий для коров и КРС (без коров) для Зоны 1, в которой наблюдали наибольшее отличие между показателями из Национального кадастра и полученными в результате исследования данными. Результаты исследования показали, что существующая тенденция по модернизации технологий переработки навоза в сторону наиболее экологических и соответствующих принципам наилучших доступных технологий ведет к снижению эмиссии парниковых газов.

Список литературы

1. Шалавина Е. В., Васильев Э. В., Папушин Э. А. Анализ технологий переработки отходов животноводства в различных природно-климатических условиях России. *АгроЭкоИнженерия*. 2023;(3(116)):110–124. DOI: <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2023-3116-110-123> EDN: WWQDQJ
2. Кузнецов Е. В., Хаджиди А. Е., Кузнецова М. Е., Звонков Н. К. Переработка отходов животноводческих предприятий. *Научные труды КубГТУ*. 2019;(3):864–873. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38099058> EDN: VHVNMF
3. Гордеев В. В., Миронова Т. Ю., Хазанов В. Е., Гордеева Т. И., Миронов В. Н. Структурная схема управления технологическим процессом навозоудаления. *АгроЭкоИнженерия*. 2021;2(107):115–125. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46302063> EDN: GEUAAX
4. Тюрин В. Г., Лопата Ф. Ф., Потемкина Н. Н., Тарасов С. И. Органические отходы животноводства – ценный сырьевой материал. Экологические проблемы использования органических удобрений в земледелии: сб. науч. тр. Всеросс. науч.-практ. конф. с международным участием (8–10 июля 2015 г.). Владимир: ФГБНУ ВНИИОУ, 2015. С. 67–75.
5. Еськов А. И., Рябков В. В. Техническое обеспечение использования органических удобрений. *Агрохимический вестник*. 2013;(4):13–15. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21014419> EDN: RRWIEV
6. Чекмарев П. А., Родионов В. Я., Лукин С. В. Опыт использования органических удобрений в Белгородской области. *Достижения науки и техники АПК*. 2011;(2):3–4. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16333639> EDN: NTLDWV
7. Брюханов А. Ю., Васильев Э. В., Шалавина Е. В., Уваров Р. А., Субботин И. А. Метод решения экологических проблем при обращении с навозом и помётом. *Молочнохозяйственный вестник*. 2017;3(27):84–96. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30275937> EDN: ZMNSXD
8. Караева Ю. В., Тимофеева С. С., Гильфанов М. Ф. Возможности применения эффлюента биогазовой установки. *Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии*. 2020;(2(50)):68–75. DOI: <https://doi.org/10.18286/1816-4501-2020-2-68-74> EDN: AATMYI
9. Власов В. А., Воронов Г. Е. Некоторые теоретические и практические проблемы, возникающие при обращении с жидкими отходами продукции животноводства (часть первая). *Право и государство: теория и практика*. 2022;(3(207)):205–209. DOI: https://doi.org/10.47643/1815-1337_2022_3_205 EDN: WIDBXZ
10. Гузь В., Петров И. Б. Об использовании отходов животноводства при осуществлении экономической деятельности. *Твердые бытовые отходы*. 2021;(1(175)):56–59. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45489050> EDN: DISDVQ
11. Дабахова Е. В., Питина И. А. Агроэкологические проблемы использования органических удобрений в сельском хозяйстве. *Агрохимический вестник*. 2017;(2):10–14. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28989377> EDN: YKJSYJ

12. Genstwa N., Zmysłona J. Greenhouse gas emissions efficiency in Polish agriculture. *Agriculture*. 2024;14(1):56. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture14010056>
13. Višковић M. I., Đatkov Đ. M., Nesterović A. Ž., Martinov M. L., Cvetković S. M. Manure in Serbia – quantities and greenhouse gas emissions. *Journal of Agricultural Sciences*. 2022;67(1):29–46. DOI: <https://doi.org/10.2298/JAS2201029V>
14. Ortiz Balsero A. S., Zelt M., Millmier Schmidt A., Fudolig M., Miller D. N. Effect of bromoform and linseed oil on greenhouse gas emissions from stored beef manure from stored beef manure. 2022 ASABE Annual International Meeting. 2022. ASABE Paper No. 2200416. DOI: <https://doi.org/10.13031/aim.202200416>
15. Chang F., Fabian-Wheeler E., Richard T. L., Hile M. Compaction effects on greenhouse gas and ammonia emissions from solid dairy manure. *Journal of Environmental Management*. 2023;332:117399. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117399>
16. Li L., Liu Y., Kong Y., Zhang J., Shen Y., Li G., Wang G., Yuan J. Relating bacterial dynamics and functions to greenhouse gas and odor emissions during facultative heap composting of four kinds of livestock manure. *Journal of Environmental Management*. 2023;345:118589. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118589>
17. Meng X., Sørensen P., Møller H. B., Petersen S. O. Greenhouse gas balances and yield-scaled emissions for storage and field application of organic fertilizers derived from cattle manure. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2023;345:108327. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108327>
18. Ba S., Qu Q., Zhang K., Groot J. C. J. Meta-analysis of greenhouse gas and ammonia emissions from dairy manure composting. *Biosystems Engineering*. 2020;193:126–137. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.02.015>
19. Zhu Z., Li L., Dong H., Wang Y. Ammonia and greenhouse gas emissions of different types of livestock and poultry manure during storage. *Transactions of the ASABE*. 2020;63(6):1723–1733. DOI: <https://doi.org/10.13031/trans.14079>

References

1. Shalavina E. V., Vasilev E. V., Papushin E. A. Analysis of technologies for processing animal waste in different natural and climatic conditions of Russia. *AgroEkoInzheneriya* = Agricultural Engineering (Moscow). 2023;(3(116)):110–124. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2023-3116-110-123>
2. Kuznetsov E. V., Khadzhi A. E., Kuznetsova M. E., Zvonkov N. K. Processing of waste of animal enterprises. *Nauchnye trudy KubGTU* = Scientific Works of the Kuban State Technological University. 2019;(3):864–873. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38099058>
3. Gordeev V. V., Mironova T. Yu., Khazanov V. E., Gordeeva T. I., Mironov V. N. Block diagram of manure removal control. *AgroEkoInzheneriya* = Agricultural Engineering (Moscow). 2021;2(107):115–125. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46302063>
4. Tyurin V. G., Lopata F. F., Potemkina N. N., Tarasov S. I. Organic waste from animal husbandry is a valuable raw material. Environmental problems of the use of organic fertilizers in agriculture: collection of scientific articles of the All-Russian Scientific and practical conference with international participation (July 8-10, 2015). Vladimir: FGBNU VNIIOU, 2015. pp. 67–75.
5. Eskov A. I., Ryabkov V. V. On the technical support of the use of organic fertilizers. *Agrokhimicheskii vestnik* = Agrochemical Herald. 2013;(4):13–15. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21014419>
6. Chekmarev P. A., Rodionov V. Ya., Lukin S. V. Experience with organic fertilizers in Belgorod region. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK* = Achievements of Science and Technology of AICis. 2011;(2):3–4. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16333639>
7. Bryukhanov A. Yu., Vasilev E. V., Shalavina E. V., Uvarov R. A., Subbotin I. A. Method of environmental problem solution in manure management. *Molochnokhozyaystvennyy vestnik*. 2017;3(27):84–96. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30275937>
8. Karaeva Yu. V., Timofeeva S. S., Gilfanov M. F. Possibilities of application the effluent of biogas unit. *Vestnik Ul'yanovskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii* = Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy. 2020;(2(50)):68–75. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18286/1816-4501-2020-2-68-74>
9. Vlasov V. A., Voronov G. E. Some theoretical and practical problems that arise when handling liquid waste from livestock products (part one). *Pravo i gosudarstvo: teoriya i praktika* = Law and State: The Theory and Practice. 2022;(3(207)):205–209. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.47643/1815-1337_2022_3_205
10. Guz V., Petrov I. B. On the use of animal husbandry waste in the implementation of economic activities. *Tverdye bytovye otkhody* = Municipal Solid Waste. 2021;(1(175)):56–59. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45489050>
11. Dabakhova E. V., Pitina I. A. Agroecological problems of organic fertilizers use in agriculture. *Agrokhimicheskii vestnik* = Agrochemical Herald. 2017;(2):10–14. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28989377>
12. Genstwa N., Zmysłona J. Greenhouse gas emissions efficiency in Polish agriculture. *Agriculture*. 2024;14(1):56. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture14010056>

13. Višković M. I., Đatkov Đ. M., Nesterović A. Ž., Martinov M. L., Cvetković S. M. Manure in Serbia – quantities and greenhouse gas emissions. *Journal of Agricultural Sciences*. 2022;67(1):29–46.
DOI: <https://doi.org/10.2298/JAS2201029V>
14. Ortiz Balsero A. S., Zelt M., Millmier Schmidt A., Fudolig M., Miller D. N. Effect of bromoform and linseed oil on greenhouse gas emissions from stored beef manure from stored beef manure. 2022 ASABE Annual International Meeting. 2022. ASABE Paper No. 2200416. DOI: <https://doi.org/10.13031/aim.202200416>
15. Chang F., Fabian-Wheeler E., Richard T. L., Hile M. Compaction effects on greenhouse gas and ammonia emissions from solid dairy manure. *Journal of Environmental Management*. 2023;332:117399.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117399>
16. Li L., Liu Y., Kong Y., Zhang J., Shen Y., Li G., Wang G., Yuan J. Relating bacterial dynamics and functions to greenhouse gas and odor emissions during facultative heap composting of four kinds of livestock manure. *Journal of Environmental Management*. 2023;345:118589. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118589>
17. Meng X., Sørensen P., Møller H. B., Petersen S. O. Greenhouse gas balances and yield-scaled emissions for storage and field application of organic fertilizers derived from cattle manure. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2023;345:108327. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108327>
18. Ba S., Qu Q., Zhang K., Groot J. C. J. Meta-analysis of greenhouse gas and ammonia emissions from dairy manure composting. *Biosystems Engineering*. 2020;193:126–137. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.02.015>
19. Zhu Z., Li L., Dong H., Wang Y. Ammonia and greenhouse gas emissions of different types of livestock and poultry manure during storage. *Transactions of the ASABE*. 2020;63(6):1723–1733.
DOI: <https://doi.org/10.13031/trans.14079>

Сведения об авторах

Александр Юрьевич Брюханов, член-корреспондент РАН, доктор техн. наук, директор Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – ФГБНУ филиала «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», Филътровское ш. 3, пос. Тярлево, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 196634, e-mail: sznii@ya.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4963-3821>

✉ **Екатерина Викторовна Шалавина**, кандидат техн. наук, старший научный сотрудник Отдела анализа и прогнозирования экологической устойчивости агроэкосистем Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиала ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», Филътровское ш. 3, пос. Тярлево, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 196634, e-mail: sznii@ya.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7345-1510>, e-mail: shalavinaev@mail.ru

Эдуард Вадимович Васильев, кандидат техн. наук, ведущий научный сотрудник Отдела анализа и прогнозирования экологической устойчивости агроэкосистем Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиала ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», Филътровское ш. 3, пос. Тярлево, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 196634, e-mail: sznii@ya.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5910-5793>

Information about the authors

Aleksandr Yu. Briukhanov, corresponding member of RAS, DSc in Engineering, Director of Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production – branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 3, Filtrovskoye Shosse, Tiarlevo, Saint Petersburg, Russian Federation, 196634, e-mail: sznii@ya.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4963-3821>

✉ **Ekaterina V. Shalavina**, PhD in Engineering, senior researcher, Department of Analysis and Forecasting of Environmental Sustainability of Agroecosystems, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production – branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 3, Filtrovskoye Shosse, Tiarlevo, Saint Petersburg, Russian Federation, 196634, e-mail: sznii@ya.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7345-1510>, e-mail: shalavinaev@mail.ru

Eduard V. Vasilev, PhD in Engineering, leading researcher, Department of Analysis and Forecasting of Environmental Sustainability of Agroecosystems, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production – branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 3, Filtrovskoye Shosse, Tiarlevo, Saint Petersburg, Russian Federation, 196634, e-mail: sznii@ya.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5910-5793>

✉ – Для контактов / Corresponding author

**ПАМЯТИ УЧЕНОГО
ЦОЙ ЮРИЙ АЛЕКСЕЕВИЧ**



8 июня 2024 года ушел из жизни выдающийся ученый и практик в области механизации животноводства, главный научный сотрудник Центра ВИМ, член редакционного совета журнала, член-корреспондент РАН Юрий Алексеевич Цой.

Родился 05.04.1941 г. в г. Кзыл-Орде Казахской ССР. Окончил Целиноградский СХИ (1963). Доктор технических наук (1988), профессор (1992), член-корреспондент РАСХН (2007), член-корреспондент РАН (2014). Видный ученый в области механизации и автоматизации животноводства. Работал инженером, главным инженером отдела Северного НИИ животноводства (1963–1967). Аспирант ВНИИ электрификации сельского хозяйства (1967–1970). Младший, старший научный сотрудник (1970–1974), заведующий лабораторией (1974–1976), заведующий отделом (с 1976 г.) ФГБНУ "Всероссийский НИИ электрификации сельского хозяйства". Одновременно (с 1992 г.) – генеральный директор Научно-производственного предприятия «Фемакс».

Под его руководством и при непосредственном участии разработаны: научные основы и инженерные методы расчета и проектиро-

вания технологических линий доения, обработки и переработки молока; методы оптимизации параметров отдельных процессов и видов оборудования молочных ферм, рациональные технологические и планировочные фермы, включенные в типовые проекты; методы функционального анализа и синтеза машин для животноводства и разработка на их основе элементарно-агрегатной базы: блочно-модульные принципы создания машин для животноводства и концепция поэтапной модернизации и обновления технической базы отрасли; программно-алгоритмические методы и цифровые системы управления, контроля, диагностики машин и оборудования для молочных ферм; конкурентоспособная импортозамещающая техника для молочных ферм. За период его деятельности при непосредственном участии было поставлено на серийное производство 23 наименования новых машин и оборудования. Проекты, выполненные под его руководством, неоднократно выходили победителями всесоюзных и республиканских конкурсов. Являлся научным руководителем Российско-Белорусской программы по разработке нового оборудования для получения качественной молочной продукции.

Заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации (1996), награжден Почетной грамотой Министерства сельского хозяйства РСФСР (1985). Опубликовано более 220 научных трудов. Имеет более 80 авторских свидетельств и патентов на изобретения.

Юрий Алексеевич много сделал для разработки и внедрения доильных установок и станочного оборудования для сельхозпроизводителей Кировской области, работая совместно с отделом механизации и ПКБ нашего Центра, а также заводами области: Маяк, Слободской машиностроительный и другими промышленными предприятиями. Он был очень активен, открыт в совершенствовании своих новых разработок, патриотичен и работоспособен.

**Коллектив ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока
выражает глубокое соболезнование родным и близким
Юрия Алексеевича Цоя.**

**Светлая память о яркой личности, авторитетном ученом
навсегда сохранится в наших сердцах.**



Постановлением Президиума Российской Академии Наук
от 21 мая 2024 г.

Премия имени Николая Васильевича Рудницкого

за научно-исследовательскую работу «Селекция и питомниководство
ягодных культур в условиях Волго-Вятского региона» присуждена
коллективу авторов ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока: зав. лабораторией
плодово-ягодных культур, старшему научному сотруднику к.с.-х.н.
А. П. Софронову, старшему научному сотруднику к.с.-х.н.
С. В. Фирсовой, научному сотруднику **А. А. Русинову**.

Сотрудниками лаборатории за период с 2015 по 2023 год создано
пять сортов ягодных культур.

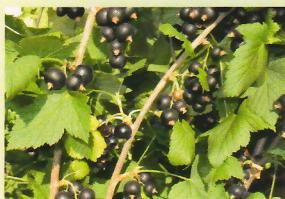


Сорта черной смородины

Шаганэ (60-6-96) (патент № 11401 от 03 февраля 2021 г.).

Соавторы: Г. А. Пленкина, Т. И. Салтыкова, Н. С. Вахрушева.

Сорт среднего срока созревания с высокой урожайностью (7,8 т/га, максимальная – 11,4 т/га),
крупноплодный, средняя масса 1 ягоды – 1,20 г, максимальная – 1,92 г. Ягода кисло-сладкого вкуса
(4,5 балла) с содержанием 119,39 мг% витамина С, 9,48% сахаров. Сорт
отличается высокой устойчивостью к почковому клещу (степень поврежде-
ния 1 балл), к мучнистой росе (степень поражения 0,5 балла). Включен в
Госреестр РФ по Волго-Вятскому региону с 2021 г.



Ариэль (71-2-07) (патент № 12944 от 14 июля 2023 г.).

Соавторы: Т. И. Салтыкова, Н. С. Вахрушева, Г. А. Пленкина.

Сорт среднего срока созревания с высокой урожайностью (7,7 т/га, максимальная – 9,3 т/га).
Сорт крупноплодный, средняя масса 1 ягоды – 1,7 г, максимальная – 2,5 г. Ягода кисло-сладкого
вкуса (4 балла) с содержанием 140,36 мг% витамина С, 6,81 % сахаров. Сорт отличается
высокой устойчивостью к почковому клещу (степень повреждения 0 баллов) и к мучнистой росе
(степень поражения 1 балл). Включен в Госреестр РФ по Волго-Вятскому региону с 2023 года.

Сорта жимолости

Флагман (3-2000) (патент № 11400 от 3 февраля 2021 г.).

Соавтор: Г. А. Пленкина.

Сорт среднего срока созревания с высокой и стабильной по годам урожай-
ностью (средняя – 5,7 т/га, максимальная – 9,8 т/га). Сорт крупноплодный,
средняя масса 1 ягоды – 0,99 г, максимальная – 1,42 г. Ягоды хорошего кисло-
сладкого вкуса (4 балла) с содержанием 34,03 мг% витамина «С», 8,37 % сахаров, 14,69% сухих
веществ. Сорт отличается зимостойкостью, слабой степенью осыпаемости и сухим отрывом ягод.
Включён в Госреестр РФ по Волго-Вятскому региону с 2021 г.



Союз (№ 39) (заявка на патент №85161/7853466 с датой приоритета 24.11.2021).

Соавторы: А. В. Кондрикова (ВИР), Т. И. Салтыкова, Н. С. Вахрушева.

Сорт позднего срока созревания с хорошей и стабильной по годам урожайностью (средняя –
3,35 т/га, максимальная – 5,1 т/га). Сорт крупноплодный, средняя масса 1 ягоды – 0,88 г, макси-
мальная – 0,94 г. Ягоды хорошего кисло-сладкого вкуса (4 балла) с содержанием 75,1 мг% вита-
мина С, 6,8 % сахаров, 13,05 % сухих веществ, 2,67 % кислот. Сорт отличается зимостойкостью,
поздним сроком созревания, слабой степенью осыпаемости и сухим отрывом ягод.

Сорт земляники садовой

Мелодия (3-61) (патент № 11324 от 13 декабря 2020 г.).

Соавторы: Н. С. Вахрушева, Г. А. Пленкина, Т. И. Салтыкова.

Сорт раннего срока созревания с высокой урожайностью (средняя – 5,9 т/га, максимальная –
12,7 т/га). Сорт крупноплодный, средняя масса 1 ягоды – 5,1 г, максимальная – 23,1 г. Ягода хоро-
шего кисло-сладкого вкуса (4 балла) с содержанием 95,92 мг% витамина С, 7,82% сахаров.
Сорт отличается высокой устойчивостью к земляничному клещу (степень повреждения 1 балл)
и листовым пятнистостям (степень поражения 1 балл).