

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

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

Ответственные секретари: Соболева Наталия Николаевна, инженер по НТИ научно-организационного отдела ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока, г. Киров, Россия,
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 «Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия», г. Нижний Новгород, Россия

Иванов Дмитрий Анатольевич д.с.-х.н., профессор, чл.-корр. РАН, главный научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института мелиорированных земель – филиала ФГБНУ ФИЦ «Почвенный институт им. В. В. Докучаева», г. Тверь, Россия

Казакевич Пётр Петрович д.т.н., профессор, чл.-корр. НАН Беларуси, зам. председателя Президиума НАН Беларуси, иностранный член РАН, г. Минск, Республика Беларусь

Косолапов Владимир Михайлович д.с.-х.н., профессор, академик РАН, научный руководитель ФГБНУ «Федеральный научный центр кормопроизводства и агроэкологии имени В. Р. Вильямса», г. Москва, Россия

Костяев Александр Иванович д.э.н., профессор, академик РАН, главный научный сотрудник, руководитель отдела экономических и социальных проблем развития региональных АПК и сельских территорий Института аграрной экономики и развития сельских территорий – структурного подразделения ФГБНУ «Санкт-Петербургский ФИЦ РАН», г. Санкт-Петербург, Россия

Куликов Иван Михайлович д.э.н., профессор, академик РАН, директор ФГБНУ «Федеральный научный селекционно-технологический центр садоводства и питомниководства», г. Москва, Россия

Леднев Андрей Викторович д.с.-х.н., доцент, главный научный сотрудник, руководитель Удмуртского НИИСХ – структурного подразделения ФГБНУ «Удмуртский ФИЦ Уро РАН», г. Ижевск, Россия

Никонова Галина Николаевна д.э.н., профессор, чл.-корр. РАН, главный научный сотрудник, руководитель отдела прогнозирования трансформации экономических структур и земельных отношений Института аграрной экономики и развития сельских территорий – структурного подразделения ФГБНУ «Санкт-Петербургский ФИЦ РАН», г. Санкт-Петербург, Россия

Пашкина Юлия Викторовна д.в.н., профессор, и.о. зав. кафедрой эпизоотологии, паразитологии и ветеринарно-санитарной экспертизы ФГБОУ ВО «Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия», г. Нижний Новгород, Россия

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

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

Полные тексты статей
доступны на сайтах электронных
научных библиотек:
eLIBRARY.RU: <http://elibrary.ru/>;
ЭНЦХБ:
<http://www.cnsb.ru/elibib.shtm>;
CYBERLENINKA:
<https://cyberleninka.ru/>;
журнала:
<http://www.agronauka-sv.ru>

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

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

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

Техническая редакция,
верстка И. В. Кодочигова

Макет обложки
Н. Н. Соболева

Подписано к печати
30.10.2023

Дата выхода в свет
07.11.2023

Формат 60x84^{1/8}.

Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 24,41.

Тираж 100 экз. Заказ 27.

Свободная цена

Отпечатано с оригинал-макета

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

Савченко
Иван Васильевич

Самоделькин
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 Новгород,
Россия

д.в.н., профессор, чл.-корр. РАН, ФГБОУ ВО «Нижегородская государственная
сельскохозяйственная академия», г. Нижний Новгород, Россия
д.с.-х.н., профессор, зав. кафедрой агрохимии и агроэкологии
ФГБОУ ВО «Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия»,
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 Цзилинского 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 сотрудник
лаборатории зерно- и семяочистительных машин ФГБНУ ФАНЦ Северо-
Востока, г. Киров, Россия

д.б.н., профессор, зав. отделом экологии и ресурсоведения ФГБНУ
«Всероссийский научно-исследовательский институт охотничьего хозяйства
и звероводства имени профессора Б. М. Житкова», г. Киров, Россия
д.в.н., ведущий научный сотрудник, зав. лабораторией ветеринарной
биотехнологии ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока, г. Киров, Россия

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Registration number
PI №FS 77-72290 01 Feb 2018

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

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

Headings

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

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



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

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

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

Tatyana V. Agalakova, Cand. of Sci. (Biology), senior researcher at the laboratory veterinary immunology, Federal Agricultural Research Center of the North-East named N.V. Rudnitsky, Kirov, Russia

Editorial council

- | | |
|------------------------------|---|
| Nikolay R. Andreev | Dr. of Sci. (Engineering), corresponding member of RAS, Academic advisor of the All-Russian Research Institute of Starch and Processing of Starch-Containing Raw Materials – Branch of Russian Potato Research Centre, Moscow, Russia |
| Vugar A. Bagirov | Dr. of Sci. (Biology), professor, corresponding member of RAS, Director of the Department of Coordination of Organizations in the Field of Agricultural Sciences of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Moscow, Russia |
| Galina A. Batalova | Dr. of Sci. (Agricultural), the professor, academician of RAS, the deputy Director on selection work, the head of Department of oats of the Federal Agricultural Research Center of the North-East named N.V. Rudnitsky, Kirov, Russia |
| Alexander M. Guryanov | Dr. of Sci. (Agricultural), professor, 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 Agricultural Academy, 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 the Nizhny Novgorod State Agricultural Academy, 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

Passed for printing
30.10.2023
Date of publication
07.11.2023

Format 60x84^{1/8}. Offset paper.
Cond. pecs. 1. 24.41.
Circulation 100 copies. Order 27.
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 Agricultural Academy, Nizhny Novgorod, Russia
- Vera I. Titova** Dr. of Sci. (Agricultural), professor, Head of the Department of Agrochemistry and Agroecology of Nizhny Novgorod State Agricultural Academy, 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. Sheshanova** Dr. of Sci. (Biology), senior researcher, head of the Laboratory of Immunity and Plants Protection, Federal Agricultural Research Center of the North-East named N.V. Rudnitsky, Kirov, Russia
- Gubeidulla S. Junusov** Dr. of Sci. (Engineering), professor, Institute of Agricultural Technologies of Mari State University, Yoshkar-Ola, Russia

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЗОРНЫЕ СТАТЬИ

И. В. Артамонов

Микотоксины фитопатогенных грибов и микотоксикозы: исторический очерк (обзор)..... 703

Е. Р. Фасхутдинова, Ю. В. Голубцова, О. А. Неверова, Т. А. Ларичев, Н. Н. Хорошкина

Перспективы использования эндофитных и экстремофильных микроорганизмов в борьбе с фитопатогенами сельскохозяйственных культур (обзор)..... 720

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

РАСТЕНИЕВОДСТВО

И. Ф. Дёмина

Изменчивость и взаимосвязь селекционно-ценных признаков сортов и линий яровой мягкой пшеницы в условиях Среднего Поволжья..... 739

Н. В. Кротова, Г. А. Баталова

Адаптивность образцов пленчатого овса в коллекционном питомнике..... 749

О. С. Хутинаев

Сравнение продуктивности растений картофеля при выращивании миниклубней в условиях аэрогидропоники и в горшках с почвенным субстратом..... 757

Т. А. Базанов, И. В. Ушаповский, Н. Н. Логинова, Е. В. Смирнова, П. Д. Михайлова

Метод ISSR-маркирования в исследовании генетического разнообразия сортов льна..... 767

П. А. Агеева, Н. А. Почутина, Н. В. Мисникова

Результаты и перспективы селекции люпина узколистного сидерального типа использования по продуктивности и морфо-биологическим признакам..... 777

Н. А. Зайцева, И. И. Климова

Оценка сортообразцов сафлора на продуктивность и качество в аридных условиях Северного Прикаспия..... 785

ЗАЩИТА РАСТЕНИЙ

Н. М. Арасланова, Т. С. Антонова, С. Л. Саукова, М. В. Ивевор

Разнообразие биотипов возбудителя ржавчины подсолнечника в регионах Российской Федерации..... 792

СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ МИКРОБИОЛОГИЯ И МИКОЛОГИЯ

Н. А. Боков, Р. И. Абубакирова, И. Г. Широких

Изучение агрономически ценных синергетических эффектов в бинарных культурах почвенных стрептомицетов..... 799

ЗЕМЛЕДЕЛИЕ, АГРОХИМИЯ, МЕЛИОРАЦИЯ

Е. И. Золкина

Изменение продуктивности севооборота и устойчивости агроценозов при длительном применении удобрений.... 810

КОРМОПРОИЗВОДСТВО: КОРМЛЕНИЕ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЖИВОТНЫХ

Л. Н. Кузьмина, А. П. Карташова, С. С. Кузьмин

Нормализация белкового и углеводного питания высокопродуктивных коров в период сухостоя..... 820

В. Н. Романов, А. В. Мишуров, Д. А. Никанова

Эффективность скармливания холина в «защищенной» форме в послемолочный период выращивания телят... 830

ЗООТЕХНИЯ

Е. А. Романец, Т. С. Романец, О. Л. Третьякова, Л. В. Гетманцева

Поиск генетических маркеров для селекционно-племенной работы, направленной на повышение массы поросят при рождении..... 839

А. Ю. Криворучко, А. А. Лиховид, А. А. Каниболоцкая, Т. Ю. Саприкина, М. Ю. Кухарук, О. А. Яцык

Локусы панели генотипирования секвенированием по технологии AgriSeq в породе маньчжурский меринос..... 849

ВЕТЕРИНАРНАЯ МЕДИЦИНА

А. А. Савина, О. А. Воронина, С. Ю. Зайцев

Сезонные закономерности изменения антиоксидантных и микроэлементных параметров молока коров черно-пестрой породы..... 858

МЕХАНИЗАЦИЯ, ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ, АВТОМАТИЗАЦИЯ

В. Ю. Ревенко, А. Н. Назаров, В. И. Скорляков

Методика расчета давления на почву колесных тракторов..... 868

В. А. Сысуев, С. Л. Дёмин, С. В. Гайдидей, Д. А. Зырянов

Исследование пружинного механизма подвеса сошника дернинной сеялки..... 877

ДИСКУССИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Редакционная статья. Приглашение к дискуссии..... 887

В. М. Кузнецов

Анализ полокусных оценок аллельного разнообразия STR-маркеров в выборке быков-производителей..... 888

CONTENTS

REVIEWS

Ivan V. Artamonov

Mycotoxins of phytopathogenic fungi and mycotoxicosis: a historical essay (review)..... 703

Elizaveta R. Faskhutdinova, Yulia V. Golubtsova, Olga A. Neverova, Timothy A. Larichev, Natalia N. Khoroshkina

Prospects for the use of endophytic and extremophilic microorganisms in the fight against phytopathogens of agricultural crops (review)..... 720

ORIGINAL SCIENTIFIC ARTICLES

PLANT GROWING

Irina F. Demina

Variability and interrelation of breeding-valuable traits of varieties and lines of spring soft wheat in the conditions of the Middle Volga region..... 739

Nadezda V. Krotova, Galina A. Batalova

Adaptability of accessions of filmy oats in the collection nursery..... 749

Oleg S. Khutinaev

Comparing the productivity of potato plants when growing mini-tubers in the conditions of air hydroponics and in the pots with soil substrate..... 757

Taras A. Bazanov, Igor V. Ushapovsky, Natalya N. Loginova, Ekaterina V. Smirnova, Polina D. Mikhaylova

Method of ISSR-marking in the study of genetic diversity of flax varieties..... 767

Praskovya A. Ageeva, Natalia A. Potchutina, Nadezhda V. Misnikova

The results and perspectives for breeding of the green manure narrow-leafed lupine varieties for the productivity and morph-and-biological characters..... 777

Nadezhda A. Zaitseva, Irina I. Klimova

Evaluation of safflower varieties for productivity and quality in the arid conditions of the Northern Caspian region..... 785

PLANT PROTECTION

Nina M. Araslanova, Tatyana S. Antonova, Svetlana L. Saukova, Maria V. Iwebor

Diversity of sunflower rust pathogen biotypes in the regions of the Russian Federation..... 792

AGRICULTURAL MICROBIOLOGY AND MYCOLOGY

Nikita A. Bokov, Roza I. Abubakirova, Irina G. Shirokikh

Study of agronomically valuable synergistic effects in binary cultures of soil streptomycetes..... 799

AGRICULTURE, AGROCHEMISTRY, LAND IMPROVEMENT

Ekaterina I. Zolkina

Changes in crop rotation productivity and stability of agroecosystems with prolonged use of fertilizers..... 810

FODDER PRODUCTION: LIVESTOCK FEEDING

Lyudmila N. Kuzmina, Anastasia P. Kartashova, Sergey S. Kuzmin

Normalization of protein and carbohydrate nutrition for high productive cows during a dry period..... 820

Viktor N. Romanov, Aleksey V. Mishurov, Darya A. Nikanova

The effectiveness of feeding choline in a "protected" form in the post-dairy period of calf rearing..... 830

ZOOTECHNY

Elena A. Romanets, Timofey S. Romanets, Olga L. Tretyakova, Lyubov V. Getmantseva

Search for genetic markers for selection and breeding aimed at increasing birth weight of piglets..... 839

Alexander Yu. Krivoruchko, Andrey A. Likhovid, Anastasia A. Kanibolotskaya, Tatyana Yu. Saprikina,

Maxim Yu. Kuharuk, Olesya A. Yatsyk

Loci of the genotyping panel by sequencing using AgriSeq technology in the Manych Merino breed..... 849

VETERINARY MEDICINE

Anastasia A. Savina, Oksana A. Voronina, Sergey Yu. Zaitsev

Seasonal patterns of changes in antioxidant and microelement parameters of milk from black-and-white cows..... 858

MECHANIZATION, ELECTRIFICATION, AUTOMATION

Valery Yu. Revenko, Andrej N. Nazarov, Victor I. Skorlyakov

Method of calculating the pressure on the soil of wheeled tractors..... 868

Vasiliy A. Sysuev, Sergey L. Demshin, Sergey V. Gaididei, Dmitry A. Zyryanov

Study of the spring suspension mechanism of the coulter of the sod seeder..... 877

DISCUSSION PAPERS

Article editorial..... 887

Vasiliy M. Kuznetsov

Analysis of locus estimates of allelic diversity of STR markers in a sample of breeding bulls..... 888

<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.5.703-719>

УДК 632.4.01/.08



Микотоксины фитопатогенных грибов и микотоксикозы: исторический очерк (обзор)

© 2023. И. В. Артамонов

ФГБУН «Вологодский научный центр Российской академии наук», г. Вологда, Российская Федерация

Плесневые грибы и продуцируемые ими микотоксины неизменно сопровождали человека, начиная с тех пор, как основой его существования стало сельское хозяйство, позволяющее получать больше продукции, чем было необходимо для потребления, а также требовавшее хранения урожая между сезонами. Это обеспечило благоприятную экологическую нишу для плесневых грибов, а хранящаяся продукция сельского хозяйства стала основным источником микотоксинов в рационах человека и сельскохозяйственных животных. С этого момента микотоксины были причиной множества масштабных отравлений и наносили значительный ущерб сельскому хозяйству. В статье приводится краткий исторический очерк и наиболее значимые этапы исследования микотоксинов, являющихся источником частых и масштабных поражений, раскрываются специфические обстоятельства, ставшие причиной пристального интереса исследователей к этой группе веществ. Длительное время непосредственная причина отравлений, вызываемых микотоксинами, оставалась неизвестной из-за слабой технической вооруженности исследователей и выделение действующих веществ оказывалось невозможным, что, однако, не было препятствием для разработки способов борьбы с заражением плесневыми грибами и отравлениями, вызываемыми микотоксинами. Совершенствование технической базы исследований в середине 20 века стало причиной роста числа открытых микотоксинов и обнаружения новых токсических эффектов уже известных соединений. Микотоксины остаются одними из наиболее опасных контаминантов и кормов сельскохозяйственных животных, и продуктов питания, несмотря на то что во многих странах они являются предметом строгого регулирования и контроля. В условиях нарастающей интенсификации сельского хозяйства, снижения видового разнообразия сельскохозяйственных культур вопрос о распространении плесневых грибов и, как следствие, о степени пораженности продукции сельского хозяйства микотоксинами не теряет своей важности, а изучение истории исследования микотоксинов и их продуцентов может предоставить важную информацию о распространении плесневых грибов в новых условиях хозяйствования.

Ключевые слова: токсины плесневых грибов, вторичные метаболиты, плесневые грибы, сельское хозяйство, токсины, токсикозы, история изучения

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-26-00163 (<https://rscf.ru/project/23-26-00163/>).

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

Конфликт интересов: автор заявил об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Артамонов И. В. Микотоксины фитопатогенных грибов и микотоксикозы: исторический очерк (обзор). *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2023;24(5):703-719. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.5.703-719>

Поступила: 20.06.2023

Принята к публикации: 19.09.2023

Опубликована онлайн: 30.10.2023

Mycotoxins of phytopathogenic fungi and mycotoxicosis: a historical essay (review)

© 2023. Ivan V. Artamonov

Vologda Research Center of the Russian Academy of Sciences, Vologda, Russian Federation

Mold fungi and the mycotoxins they produce have invariably accompanied humans, since the basis of its existence was agriculture, which allows to get more products than was necessary for consumption, as well as requiring the storage of crops between seasons. This provided a favorable ecological niche for molds, and stored agricultural products became the main source of mycotoxins in the diets of humans and farm animals. Since then, mycotoxins have been the cause of many large-scale poisonings and have caused significant damage to agriculture. The article provides a brief historical sketch and the most significant stages of the study of mycotoxins, which are the cause of frequent and large-scale lesions, reveals the specific circumstances that caused the researchers' keen interest in this group of substances. For a long time, the immediate cause of poisoning caused by mycotoxins remained unknown due to the weak technical equipment of researchers and the isolation of active substances was impossible, which, however, was not an obstacle to the development of methods to combat infection with mold fungi and poisoning caused by mycotoxins. The improvement of the technical base of research in the middle of the 20th century led to an increase in the number of discovered mycotoxins and the discovery of new toxic effects of

already known compounds. Mycotoxins remain one of the most dangerous contaminants in both farm animal feed and food, despite the fact that in many countries they are subject to strict regulation and control. In the context of the increasing intensification of agriculture, a decrease in the species diversity of agricultural crops, the problem of the spread of mold fungi and, as a result, the degree of mycotoxin damage to agricultural products does not lose its importance, and the study of the history of the study of mycotoxins and their producers can provide important information on the spread of mold fungi in new economic conditions.

Keywords: *toxins of mold fungi, secondary metabolites, molds, agriculture, toxins, toxicosis, history of study*

Acknowledgements: the reported study was funded by the Russian Science Foundation (research project No. 23-26-00163) (<https://rscf.ru/project/23-26-00163/>).

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

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

For citation: Artamonov I. V. Mycotoxins of phytopathogenic fungi and mycotoxicosis: a historical essay (review). *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2023;24(5):703-719. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.5.703-719>

Received: 20.06.2023

Accepted for publication: 19.09.2023

Published online: 30.10.2023

Токсины плесневых грибов, которые на сегодня представляют собой обширную и разнородную группу химических веществ, где их насчитывается более 400 и постоянно открываются новые, по всей видимости регулярно присутствуют в пище человека и корме домашних животных как минимум на протяжении 10000 лет. Напрямую это связано не с собственно началом возделывания зерновых культур, таких как пшеница, рожь, рис и других, а с межсезонным хранением урожая и употреблением в пищу запасенного зерна, которое стало новым субстратом для роста плесневых грибов и обеспечило им широчайшее распространение и, как следствие, массовое проникновение в пищу и корма.

Следует оговориться, что в широком смысле микотоксинами можно считать все метаболиты плесневых грибов (и некоторых высших, например – агаритин, метаболит агариновых), обладающих токсическим действием на другие организмы, и в этом контексте используемые в медицинской практике антибиотики, продуцируемые плесневыми грибами, также являются микотоксинами. Обе группы обеспечивают их продуценту конкурентные преимущества в естественной среде обитания. Однако, если антибиотики обладают активностью в отношении бактерий (термин употребим исключительно в отношении веществ, вырабатывающихся естественным образом), то микотоксины обладают более широким токсическим действием. Тем не менее, некоторые микотоксины имеют выраженное бактериостатическое действие, благодаря чему в 1940-х годах возросло внимание к микотоксинам, как возможным антибиотикам. В частности, интенсивно исследовались антибактериальные возможности цитринина, показавшего достаточно высокую эффективность против грамположительных

и грамотрицательных бактерий. Однако выявленная сильная нефротоксичность цитринина привела к снижению интереса [1].

Будучи тяжелыми токсикантами, вызывающими самые разнообразные клинические симптомы, микотоксины тем самым в значительной степени маскируют свое воздействие на живые организмы. Многие из них имеют отложенные эффекты, проявляющиеся лишь при длительной экспозиции (хронические микотоксикозы) и/или в виде неспецифических патологий, таких как онкологические заболевания, поражения внутренних органов. Микотоксины также оказывают мутагенное действие и вызывают системные нарушения (например, алиментарный токсический агранулоцитоз).

Поскольку микотоксины являются основными действующими веществами плесневых грибов, история их изучения максимально тесно связана с изучением самих плесневых грибов. Тем более, что выделить сами токсины длительное время не представлялось возможным как по причине их низкой концентрации (только отдельные группы токсинов продуцируются в относительно больших количествах, например, фумонизины, дезоксиниваленон, афлатоксины, охратоксин А), так и широкого их разнообразия, что значительно затрудняет выявление токсичного агента.

Цель обзора – дать краткую информацию по истории изучения микотоксинов в контексте их влияния на сельскохозяйственную продукцию и здоровье человека, показать разнообразие вызываемых ими токсических эффектов. В обзоре представлены основные исторические этапы и перспективы изучения микотоксинов.

Материал и методы. Основными источниками литературы служили международные базы данных Web of Science, Science Direct, PubMed, часть размещена в базах Google

Scholar, E-library, Cyberleninka, CabDirect. Поиск осуществляли по ключевым словам: Mycotoxins, Mold toxins, Mold, Mycotoxicosis, History of mycotoxins, Mycotoxins impact. При поиске русскоязычных источников использовали ключевые слова: микотоксины, история изучения микотоксинов, токсины плесневых грибов, микотоксикозы. Подбор литературы осуществляли по непосредственным литературным спискам, приведенным в проанализированных источниках, с целью их более тщательного изучения. Первичный анализ проводили по соответствию аннотаций, а при отсутствии таковых – полному анализу текста, поскольку в течение 20 века существенно изменялись применяемая в исследуемом направлении терминология и взгляды на причину токсикозов. Суммарно в ходе работы над обзором было обработано не менее 200 источников, из которых в список литературы вошли 89 публикаций. Большинство источников было отброшено по причине отсутствия полного текста публикации (в основном это касается исторических публикаций). Ограничений по временному периоду поиска не вводилось, поскольку обзор является историческим, отражающим многовековой опыт взаимодействия человека и плесневых грибов как источников микотоксинов.

Основная часть. Об опасности контактов с плесневыми грибами было известно задолго до объяснения их токсического действия. Так, уже в Древнем Риме при хранении зерна уделялось особое внимание соблюдению правил снижения риска поражения его плесенью, для чего предписывалось обустройство зернохранилищ с постоянной циркуляцией воздуха для сушки и охлаждения зерна [2].

Токсины спорыньи. Явным свидетельством пристального внимания к негативной роли плесневых грибов вообще можно считать изложенный в Библии порядок действий при обнаружении плесени внутри жилого помещения, который предписывал контролировать распространение плесени, удалять части конструкции дома, пораженные плесенью («язвой»), вплоть до полного уничтожения жилища¹. Однако, за исключением явных связей между появлением плесени и здоровьем, длительное время определить роль плесневых грибов в возникновении патологических состояний,

вызванных продуцируемыми ими токсинами, не удавалось. Например, лишь в 1630 году была надежно установлена связь между заражением ржи и пшеницы спорыньей и случаями эрготизма («Антониевого огня») среди употреблявших зараженное зерно [3].

Первое в западноевропейской средневековой историографии упоминание эпидемии отравления токсинами спорыньи, по всей видимости, содержится в Ксантенских анналах («Annales Xantenses») и датируется 857 годом, что в настоящее время трактуется как свидетельство низкой агрономической культуры в Европе того времени.

Следующая исторически достоверно задокументированная эпидемия отравления спорыньей датируется 945 годом в Париже. За нею последовала эпидемия 994 года в Аквитании, жертвами которой стали более 40 тысяч человек. В обоих случаях было установлено, что питавшиеся зерном из монастырских запасов не подверглись поражению [4].

Более ранние свидетельства отравлений спорыньей в Европе отсутствуют. С определенной степенью уверенности можно говорить о том, что первое упоминание о спорынье, связанное с вызываемыми ею отравлениями, содержится на глиняных табличках из Ассирии, где упоминаются «ядовитые пустулы в колосьях», в работах римского историка Лукреция, который описывает болезнь с названием «*ignis sacer*» («Святой огонь»), которым в европейское средневековье был назван эрготизм в гангренозной форме. Еще одно описание болезни, симптоматически схожей с эрготизмом (отравленные травы, вызывающие выкидыши и смерть при родах), дано в священных книгах парсов².

По мере широкого распространения ржи в Европе отравления токсинами спорыньи становились более частыми и массовыми, принимая характер эпидемий. Лишь в конце 17 века доктором Тюлье были получены доказательства того, что поедание зараженной спорыньей ржи вызывает эрготизм. Тюлье установил, что выраженность симптомов эрготизма напрямую зависит от количества употребленной зараженной ржи. Другим фактом, установленным Тюлье, была зависимость частоты заболевания от разнообразия диеты – чем разнообразнее она была, тем реже данная группа людей страдала эрготизмом.

¹Библия. Книга Левит. М.: Российское библейское общество, 2014. 1377 с.

²Этническая и конфессиональная группа обитателей Южной Азии (Индии, Пакистана), имеющая иранское происхождение.

Столетие спустя, в 1778 году, Анри-Алессандр Тессье рекомендовал ввести в агрономическую практику улучшение дренирования почв и принудительную очистку зерна от склероциев спорыньи. По его предложению в культуре широко распространился картофель, снизивший тем самым потребление ржи и, как следствие, частоту отравлений.

Тем не менее, эпидемии эрготизма имели место вплоть до середины 20 века, в 1951 году в Пон-Сент-Эспри (Франция) был зафиксирован последний случай массового отравления спорыньей³. Однако в последние десятилетия заражения посевов спорыньей стали распространяться в Европе шире, нежели это было в предыдущие годы. Множественные случаи выявления высоких концентраций алкалоидов спорыньи фиксированы, например, с 1985 по 2006 год в таких странах с развитым сельским хозяйством, как Швейцария, Дания, Германия и других [5]. Аналогичные случаи выявлены в канадских провинциях. В 2008 году 12-15 % всех образцов канадской красной яровой пшеницы были поражены алкалоидами спорыньи, в 2011 году доля таких образцов достигала уже 29 %. Подобная ситуация имела место с образцами канадской янтарной твердой пшеницы, доля зараженных образцов которой в 2008 г. составляла 15 %, в 2011 г. – 14 % [6].

Длительное время спорынья рассматривалась исключительно в качестве вредителя злаков. Однако в период европейского Возрождения появляется и научный интерес к этому грибу и, как следствие, попытки его использования в практических целях. В 1555 году выходит труд немецкого врача и ботаника Адама Лоницера «Травяная книга» («*Kreuterbuch*»), в котором дается первое точное описание спорыньи как отдельного вида.

Позже, в 1582 году, Лоницер в качестве стимулирующего средства для сокращения матки при родах приводит именно спорынью и дает точную методику ее применения. Действие спорыньи в виде склероциев оказалось более эффективным, чем у всех имевшихся на то время средств, несмотря на побочные эффекты [7].

Первая научная публикация, описывающая использование спорыньи в качестве медицинского препарата, была опубликована в 1787 году доктором Генрихом Феликсом Паулицки (Heinrich Felix Paulitzky) в виде

заметки о применении в качестве средства усиления сокращений матки, полученного из склероциев порошка (*pulvis ad partum*, буквально – родильный порошок), который к тому времени более 20 лет использовался повсеместно [8].

В 1820 году спорынья была включена в фармакопею США, после чего примеру последовали Англия, Греция, Италия, Франция. Также в США в целях более обоснованного применения спорыньи провели работу по исследованию содержания в ней алкалоидов, в результате чего были выработаны строгие рекомендации, которые позволили относительно безопасно использовать препараты спорыньи в медицинской практике по всему миру [9].

Цитреовиридин. В отличие от эрготизма, обладающего множественными яркими симптомами, часто складывающимися в очень характерную картину двух типов отравления – гангренозную и конвульсивную, отравления другими типами микотоксинов практически невозможно было дифференцировать от прочих заболеваний со сходными симптомами. Вычленение случаев отравления микотоксинами в исторических документах осложняется также тем, что до недавнего времени не существовало единой схемы оформления медицинской документации и единой терминологии.

Особенно это касается азиатской медицинской традиции, которая до 20 века, а местами и гораздо дольше, радикально отличалась от европейской, пришедшей к более-менее единому плану описания заболевания уже к середине 19 века. В относительно открытом европейскому влиянию Китае это произошло несколько раньше, чем в более закрытой Японии. Тем не менее, из записей японских врачей можно узнать, что уже с середины 17 века в Японии весьма распространенным было заболевание, симптоматически очень схожее с сердечным авитаминозом⁴. В 1881 году доктор Дзюндзиро Сакаки, используя этанольные экстракты риса, пораженного плесенью, доказал, что причиной данного заболевания является токсин, продуцируемый грибами рода *Penicillium*. На основе этих данных в 1910 году на государственном уровне были приняты нормативные акты, запрещающие продажу риса, пораженного плесенью, вследствие чего частота заболеваний сердечным авитаминозом резко снизилась [10].

³Однако некоторые исследователи этой вспышки считают, что причиной отравления были соединения ртути или трихлорид азота.

⁴Сердечная недостаточность, вызванная дефицитом тиамина, известная также как *cardiac beriberi*.

Аналогичные исследования выполнил в 1905 году британский врач Чарльз Хоуз⁵, работавший на острове Борнео в штате Сарауак. Подопытные обезьяны и куры, которым в качестве корма был предложен пораженный плесенью рис, демонстрировали вялость и симптомы паралича. Краткий отчет Хоуза о проведенном эксперименте дан в 73 ежегодном сборнике Британской медицинской ассоциации за 1905 год [11].

Выделенный в японском Институте использования риса (Rice Utilization Institute) в 1947 году токсин был назван «цитреовиридин». В последующие годы он был хорошо изучен, а разработанные меры по предотвращению роста грибка вида *Penicillium citreonigrum* (главного продуцента токсина) позволили практически полностью устранить заражение продуктов этим токсином. Однако даже в 21 веке отмечались поражения цитреовиридином. Последний такой случай имел место в 2006 году на севере Бразилии, где отмечено более 1000 случаев заболевания, симптоматически полностью идентичного сердечному авитаминозу, вызываемому цитреовиридином, и более 40 смертей среди фермеров [12].

Сотрудниками Института использования риса, восстановленного в статусе Бюро по контролю за продуктами питания Японии, были выделены и другие источники токсического поражения в желтом рисе. Например, грибок *Penicillium islandicum*, как продуцент лютеоскирина и циклохлоротина, имеющих гепатотоксическое действие, лютеоскирин, кроме того, является канцерогеном [13].

Исследования грибов рода *Penicillium*, проведенные в США в 1913 году, позволили выделить из зерен кукурузы токсичное вещество, идентифицированное как пенициллиновая кислота, ранее обнаруженное итальянским исследователем Б. Гоziо в 1896 году, чья работа фактически является первым надежным свидетельством об обнаружении продуцирования плесневыми грибами рода *Penicillium* токсичных веществ. И, хотя собственно пенициллиновая кислота была не столь токсична, это в итоге привлекло внимание исследователей США, поскольку кукуруза была одной из главных культур сельского хозяйства Соединенных Штатов [14]. Грибы рода *Penicillium* также являются продуцентами нафтохинонов, ксантомегнина, виомеллеина и цитринина.

Следствием проведения подобных исследований стало изменение способа хранения кукурузного зерна (переход от хранения в початках к хранению отделенного зерна с просушкой), постепенный переход ко всё более современным способам хранения практически полностью решил данную проблему.

С другой стороны, рост доли силосованных кормов в рационах животных вызвал волну тяжелых токсикозов у крупного рогатого скота, выражавшихся в гибели животных, а также в виде абортных явлений. В образцах таких кормов было обнаружено несколько видов плесневых грибов рода *Penicillium*, в частности *P. roqueforti* и *P. paneum*, продуцирующих разнообразные токсичные вещества, включая рокфортин, PR-токсин, пенитрем А, маркфторины А, В и С, андразины А и В, патулин и микрофеноловую кислоту. Все эти токсины обладают широким спектром действия. Рокфортин и пенитрем А, маркфторины – нейротоксическим, PR-токсин и патулин – канцерогенным, генотоксическим и т. д.

Несмотря на предпринимаемые меры по снижению заражения, силос в США (и других странах) заражен грибами рода *Penicillium* повсеместно [15]. Интенсивность поражения находится в прямой зависимости от температуры и влажности: наибольшее количество выявленных случаев приходится на более прохладные и влажные территории. В зависимости от состава силоса, к общему заражению может добавляться поражение грибами других родов, включая и те, для которых основным субстратом являются зерновые.

Охратоксин-А. В 1965 году в журнале Nature выходит краткая заметка о лабораторном исследовании нескольких штаммов гриба *Aspergillus ochraceus*, который часто встречался в образцах пшеницы с влажностью более 16 %, а также был упомянут в патенте, выданном Ведомством по патентам и товарным знакам США изобретателю Флойду Робинсу в 1939 году, который предлагал использовать посев *A. ochraceus* на семена кофе для придания им желаемых качеств⁶. При употреблении зараженного материала в пищу и использовании его в качестве кормов были отмечены случаи острой нефропатии у людей и гибели животных.

⁵Чарльз Хоуз известен также своим Отчетом о млекопитающих Борнео.

⁶United states patent office. Process of treating coffee. Floyd W. Robison, Detroit, Mich. Application May 1. 1939;271:133.

Из пяти исследованных штаммов *A. ochraceus* три оказались продуцентами нового токсина, получившего название «охратоксин А» (ОТА), вызывавшего острую жировую инфильтрацию паренхиматозных клеток печени подопытных животных (утят, крыс, белых мышей) [16].

В 1969 году ОТА впервые выделили из реального урожая зерновых [17]. В этом же году в качестве продуцента ОТА определили и грибы рода *Penicillium* (в частности *P. viridicatum*) [18]. Этот гриб был причиной широко распространенной после окончания Второй мировой войны в Скандинавских странах нефропатии свиней, вызванной использованием некачественного фуражного зерна. Родственный гриб *P. verrucosum*, также продуцент ОТА, стал причиной сходных поражений свиней в Дании, а источником – зерно ячменя. В 1985 году было впервые обнаружено наличие в сыворотке крови человека аддукта ОТА [19].

Хроническим действием относительно малых доз охратоксина А объясняется описанная впервые в 1942 году, а признанная самостоятельной нозологией в 1964 году, балканская эндемическая нефропатия (БЭН, югославский нефрит)⁷. В 1956 году сходные симптомы выявлены у жителей болгарских и румынских сел. Клиническая картина БЭН похожа с таковой при поражении охратоксином А, повышенная концентрация которого обнаружена в крови жителей эндемичных районов Балкан [20].

Охратоксин остается одним из наиболее часто встречающихся в продуктах питания микотоксинов, практически не делая исключений и поражая широкий спектр продуктов от специй (поражает до 60 % образцов) до детского питания, в основе которых продукция переработки зерновых, где до 32 % проб могут содержать повышенные концентрации охратоксина А, а в значительном числе случаев (до 4 %) концентрации превышают предельно допустимую – на уровне 0,5 мкг/кг [21, 22].

Дезоксиниваленол. В середине 1950-х годов в Японии было исследовано токсическое действие зерна, зараженного грибами рода *Fusarium* на фоне многочисленных случаев отравления людей с симптоматикой, не соответ-

ствовавшей действию уже известных токсинов. Признаки отравления – тошнота, переходящая в рвоту, диарея, боли в животе, лихорадка, раздражение горла. Подобные случаи были отмечены в Китае и Корее, а непосредственно в Японии известны с 90-х годов 19 века. Исследования действия загрязненного зерна на мышей показали сходную картину и были ассоциированы с новым микотоксином – дезоксиниваленолом (DON), известным также как vomitoxin.

Подобные случаи отмечались по всему миру в разное время. В 1928 году поражение зерна грибами *Fusarium* и симптомы отравления были отмечены в штате Индиана, США [23].

Исследования фузариоза в России и СССР. Значительный и мало исследованный пласт представляют собой публикации, изданные в России в различные годы до официального открытия DON, случаи отравления которым отмечались с 1882 года⁸ и во многом были приурочены к регионам Дальнего Востока. В 1916 году выходит обширная работа русского (позже советского) миколога Н. А. Наумова в сборнике Труды Бюро по микологии и фитопатологии Ученого Комитета, № 12 «Пьяный хлеб» [24]. Автор указывает на ежегодное поражение урожаев ржи, пшеницы и других злаковых фузариозами с последующими многочисленными отравлениями жителей Дальнего Востока России и упоминает работы других авторов, посвященные данной теме⁹.

Н. А. Пальчевский в работе «Болезни культурных злаков Южно-Уссурийского края» (1891 год) выдвигает предположение, что источником опасности является розовая плесень *Fusarium roseum*. Окончательное подтверждение этому принадлежит О. Е. Габрилович, которое изложено в диссертации на соискание степени магистра фармации «Причины ядовитости «пьяного хлеба», защищенной 21 декабря 1906 года.

Обширная эпидемия фузариоза в СССР была зафиксирована в 1932–1933 годах на территории Северного Кавказа, нанеся серьезный урон сельскому хозяйству района. Действующий токсин выделен не был, однако данная эпифитотия привлекла пристальное внимание и была подробно исследована [25].

⁷Однако в последнее время показано, что во многих случаях зависимость между выраженностью симптомов БЭН и концентрацией (наличием) в крови охратоксина А отсутствует, что ставит под сомнение гипотезу о данной причине БЭН.

⁸Пальчевский Н. А. Болезни культурных злаков Южно-Уссурийского Края. СПб, 1891. 43 с.

⁹Приводятся такие авторы как М. С. Воронин, Н. В. Сорокин, А. И. Розов, Н. К. Эпов, С. Г. Навашин, А. А. Ячевский, О. Е. Габрилович, В. Н. Углов.

Впоследствии заражению зерновых культур грибами *Fusarium* в СССР уделялось большое внимание. Данная тема в России и СССР была изучена лучше, чем во многих других странах. В частности, уже в конце 1930-х годов И. Н. Абрамов разработал основные меры предотвращения заражения зерна фузариозом [26]. В США лишь в 1963 году была выпущена публикация на аналогичную тематику, описывающая комплексный подход к решению проблемы [27].

В настоящее время в России продолжают интенсивные исследования по распространению заражений фуражного и пищевого зерна грибами рода *Fusarium* и другими фитопатогенными грибами (например, родов *Colletotrichum*, *Gloeosporium*, *Puccinia* и пр., которые не являются основными продуцентами микотоксинов, но приводят к потере урожая), что вызвано постоянным ростом интенсивности сельского хозяйства, увеличением урожайности и возвращением в оборот ранее заброшенных земель [28].

Грибы рода *Fusarium* в структуре заражений остаются хотя и не доминирующими, но одними из основных как в мире, так и в России, что отражается на качестве фуражного и пищевого зерна [29].

Несмотря на распространенность грибов рода *Fusarium* и многочисленные случаи отравления зараженным им зерном (включая и масовые), длительное время выделить действующее вещество не удавалось. Лишь в 1970 году во время очередной эпидемии отравлений зараженным ячменем из изолята штамма *F. roseum* было выделено действующее вещество – токсин трихотеценовой группы, структурно близкий известным ниваленолу и 4-ацетилниваленолу – 4-дезоксиниваленол (DON) [30].

Зеараленон. Кукурузное зерно, пораженное грибами рода *Fusarium*, вызывало совсем иные симптомы у животных, которым его скармливали. Оно вызывало преждевременное половое созревание у самок свиней. Такие случаи особо широко были распространены в 1920-х годах. Заметка в Австралийском ветеринарном журнале указывает, что в 1927 году в штате Айова (США) поражение такого рода привело к массовым потерям в свином стаде, однако опре-

делить действующее вещество не удалось, но поражение было воспроизведено скармливанием зараженной грибом кукурузы [31]. Частично структуру неизвестного токсина, выделенного из культуры *F. graminearum*, удалось определить в 1962 году, а полностью она была установлена в 1966 [32, 33]. Метаболит с эстрогенными свойствами, причастный, в частности, к нескольким случаям воздействия на детей и их ускоренным половым созреванием, продуцируемый грибами рода *Gibberella*¹⁰, был назван «зеараленон», поскольку основными поражаемыми культурами были зерновые [34].

T-2 токсин и алиментарно-токсическая алейкия. В 1933 году советскими учеными была описана вспышка неизвестной болезни, имевшая место в ряде районов СССР. Комплекс симптомов был схож с ангиной, включал в себя некротизацию миндалин, лейкопению, анемию, геморрагический диатез и был назван «септическая ангина», под таким названием вошел в справочники, а позже – как алиментарно-токсическая алейкия (АТА).

Вспышки были ограничены территориально, имели строгую сезонность и монотонность течения, что позволило некоторым исследователям сделать заключение о неинфекционном характере заболевания, гипотеза которого была исключена ввиду явного отсутствия его передачи от больных.

В опытах на кошках А. Х. Саркисовым¹¹ было показано возникновение изменений, сходных с алиментарно-токсической алейкией при кормлении животных культурой *Fusarium sporotrichioides*, выращенной на зерне [35].

Последующие многочисленные случаи вспышек алиментарно-токсической алейкии, имевшие место в период Великой Отечественной войны, послужили отправной точкой для многочисленных исследований и установления роли плесневых грибов [36]. Было определено, что заболевание возникает при употреблении зерна (проса, овса, пшеницы и т. д.), длительное время находившегося на полях перед уборкой (во многих случаях – до первого снега). В таком зерне выявляется комплекс плесневых грибов, включающий роды *Fusarium*, *Aspergillus*, *Penicillium*, *Stachybotrys*, *Dendrodochium* [37].

¹⁰Грибы рода *Gibberella* также продуцируют вещества, оказывающие сходное влияние на рост и развитие растений – растительные гормоны, в частности – гиббереллины.

¹¹А. Х. Саркисов является автором учения о болезнях человека и животных, возникающих при поражении токсинами плесневых грибов – микотоксикозов.

В 1957 году Л. Е. Олифсон, изучающий проблему АТА, выделяет из культуры грибов *Fusarium sporotrichiella*, появившихся на перезимовавшем просе, одно из действующих веществ – липотоксол – из группы микостеринов. Позже Олифсон выделяет еще два действующих вещества – спорофузариогенин (продуцируемый грибами *F. var. sporotrichioides*) и перфузариогенин (продуцируемый грибами *F. var. poae*) [38]. В этой связи следует отметить, что еще в 1935 году советскому патофизиологу И. С. Пентману удалось выделить токсичное вещество (по всей видимости, группу токсинов) из проса, которое хранилось ненадлежащим образом (под снегом). Эфирный экстракт из такого зерна, нанесенный на кожу кроликов, вызывал воспаление и некроз тканей в отличие от экстрактов из нормального проса [39].

Интенсивные и всесторонние исследования вспышек АТА хотя и не приводят к скорому выделению токсичного агента, но позволяют фактически впервые в мировой практике выработать не только меры устранения исходящей от пораженного зерна опасности, но и практическую методику качественного анализа зерна на предмет его опасности. Группа ученых Всесоюзной научно-исследовательской лаборатории по изучению ядовитых грибов под руководством А. Х. Саркисова, используя в качестве индикатора кожную реакцию кроликов на экстракт, полученный извлечением токсинов из образцов зерна в аппарате Сокслета диэтиловым (серным) эфиром, предложила надежный способ определения зараженных образцов с целью их дальнейшего недопущения к употреблению людьми или кормлению животных [40]. Также А. Х. Саркисовым было установлено, что токсины, извлекаемые из зерна, вызывающего АТА, устойчивы к высоким температурам, даже в условиях автоклавирования.

Тем не менее, длительное время главный токсичный агент, ответственный за развитие симптомов АТА, не удавалось выделить. Лишь в середине 1960-х годов, после вспышек отравления крупного рогатого скота кукурузой при симптоматике, сходной с АТА, в штатах Иллинойс (1963 и 1964 гг.) и Висконсин (1962 г.), были предприняты усилия по поиску токсина. Как и в случаях эпидемий АТА в СССР, в США общим для всех образцов зерна, вызвавшего отравления, было наличие грибов рода *Fusarium*, а в частности – *F. sporotrichiella*. Брутто-формула основного токсина была уста-

новлена в 1966 году и отличалась от таковой, найденной Л. Е. Олифсоном [41]. В 1968 г. была определена и структурная формула трихотеценового токсина, получившего название Т-2 [42].

Фумонизины. Грибы рода *Fusarium* являются продуцентами широкого спектра токсинов, природа действия которых часто оставалась неизвестной, а сами токсины не находились в сфере внимания специалистов, в том числе и по причине сложности обнаружения таковых, а в некоторых случаях – отсутствия эффекта в кратко- и среднесрочной (в пределах нескольких лет экспозиции) перспективе. Тем не менее, некоторые из токсинов проявляются достаточно ярко, чем были вызваны многочисленные исследования, призванные объяснить природу вызываемых ими синдромов.

С 19 века в США многократно фиксируется заболевание лошадей, получившее несколько названий: слепое шатание, кружащая болезнь и другие. Болезнь выражалась в характерной шатающейся походке лошадей, похожей на походку слепых животных. В 1901 году заболевание стало причиной гибели 600 лошадей в Северной Калифорнии [43], в период с 1934 по 1935 год – более 5000 лошадей в штатах Айова и Иллинойс [44, 45]. Заболевание получило официальное название – лошадиная лейкоэнцефаломалация (ЕЕМ), а в 1970-х годах был описан вид рода *Fusarium*, являвшийся основным источником токсина – *F. moniliforme* (современное название – *F. verticillioides*) [46]. Из зерен кукурузы был выделен токсин, названный «монилиноформин», а позже – «фумонизин В1» [47].

Во время вспышки ЕЕМ в Южной Африке в 1970 году было экспериментально установлено, что основным источником токсина, вызывающего рост количества случаев рака пищевода у людей, также является гриб *F. verticillioides*, кроме того обладающий свойствами кардио- и гепатотоксичности, вызывающий отек легких у свиней.

После открытия канцерогенных свойств метаболитов этого гриба возникла необходимость установления его действующих веществ. В 1988 году в рамках работ по экспериментальному канцерогенезу из культуры *F. verticillioides* были выделены токсины фумонизин В1 и В2 [48]. Практически одновременно группа французских исследователей, занимавшихся случаями ЕЕМ, выделила аналогичный токсин из культуры *F. moniliforme*, названный «макрофузин» [49].

Фумонизины имеют выраженное структурное сходство с клеточными сфинголипидами и по этой причине вызывают ингибирование фермента церамидсинтазы, приводя к накоплению сфинганина в клетках и тканях. Фумонизин В1 индуцирует окислительный стресс и апоптоз, а также нарушает экспрессию цитокинов [50]. Объяснение механизмов действия фумонизинов потребовало более 10 лет исследований, которые опровергли некоторые представления о причинах канцерогенности фумонизинов, что объясняется комплексностью их токсических эффектов и разрозненностью этого действия на организм [51].

К настоящему моменту выделены и идентифицированы более 100 различных фумонизинов, среди которых фумонизины В1, В2, В3 имеют наибольшую значимость [52].

Афлатоксины. Для некоторых токсинов характерна историческая закономерность вызываемых ими отравлений. Как указывалось выше, токсины вызывали массовые поражения как сельскохозяйственных животных, так и человека в развитых странах, чем привлекали внимание исследователей к природе таких эпидемий, поскольку последние повторялись периодически и относительно легко связывались с факторами среды.

Однако группа афлатоксинов длительное время находилась вне поля зрения, поскольку не была причиной сколько-нибудь значимых эпидемий, на которые можно было бы обратить внимание, так как отравления ими происходили преимущественно в слабо развитых регионах мира. Лишь в 1960 году после гибели индюшат численностью более 100 тысяч голов по всей Англии без явных причин и отсутствия признаков каких-либо инфекций было объявлено о «болезни Х индейки» [53]. Смерть наступала в течение 1-2 суток после начала кормления, а смертность птицы находилась в интервале 50-90 %. Причина заболевания оставалась неизвестной более года, однако источник заражения был установлен достаточно быстро. Им оказалась арахисовая мука, изготовленная в Бразилии. От первого проявления до спада заболеваемости было зафиксировано не менее 500 вспышек по всей Англии, от которых погибло более 200 тысяч индюшек. Основные патологические изменения в организмах погибших птиц касались печени. Параллельно событиям в Англии была выявлена вспышка симптоматически аналогичного заболевания уток в Кении, в корм которым добавляли арахисовую муку местного производства.

Изначальное предположение, что причиной болезни была инфекция, не подтвердилось, поскольку арахисовая мука была стерильной [53]. Извлечения из образцов арахисовой муки показали, что природа токсичного вещества была отлична от пестицидов, алкалоидов, фитотоксинов и предположительно продуцировалась микроорганизмами [54]. Аналогичные по свойствам извлечения, вызывавшие гибель подопытных животных в течение 24 часов после приема, были получены из образцов арахиса из Индии, Уганды, Нигерии, Гамбии, Ганы и других стран.

Позже поражения печени, аналогичные таковым у погибших индюшек, были обнаружены у уток, куриц, свиней, крупного рогатого скота, в рационе которых использовали арахисовую муку из Бразилии.

В образцах, полученных из Кении, было выявлено высокое содержание плесневого гриба *Aspergillus flavus*, из культуры которого методом бумажной и тонкослойной хроматографии было выделено токсичное соединение, названное «афлатоксин» [55]. В 1962 году из экстрактов того же штамма гриба афлатоксин был выделен в кристаллическом виде, а также установлено, что токсин представляет собой смесь структурно близких веществ, названных «афлатоксин В» и «афлатоксин G» [56]. Позже группа афлатоксинов расширилась до четырех соединений, из которых афлатоксин В1 распространен наиболее широко.

Основными источниками поражения афлатоксинами являются арахис, кукуруза, семена хлопка, кроме *A. flavus* активно и в значительных количествах афлатоксин продуцирует близкий к нему *A. parasiticus*. Оба гриба также являются источниками обладающей выраженным токсическим эффектом циклопиазоновой кислоты. Последняя является вторичным метаболитом *A. versicolor* и грибов рода *Penicillium* (*P. cyclopium*, *P. griseofulvum*, *P. camemberti*, *P. commune*) [57].

С 1930-х годов неоднократно сообщалось о необычно высоком уровне заболеваемости раком печени у жителей районов Африки, где значительную часть рациона составлял арахис. К 1960-м годам накопился значительный объем информации об этиологии гепатоцеллюлярной карциномы жителей этих районов Африки [58]. Масштабное исследование заболеваний раком в Африке, выполненное доктором Альфредом Джорджем Эттлом, дало основание утверждать, что по крайней мере часть случаев рака печени связана с повышенными уровнями

содержания *A. flavus* в продуктах питания больных, а продуцируемый им афлатоксин¹² может быть основным действующим веществом [59]. На возможную связь цирроза печени у детей в некоторых районах Африки с «неустановленным токсином» указывали и более ранние исследования [60]. В изданной в 1957 году Министерством здравоохранения Франции монографии с неизвестным токсином, чье распространение в продуктах питания обусловлено длительностью сезона дождей, связывается значительное колебание выявленных заболеваний раком печени во Французской Западной Африке в период с 1947 по 1949 год [61]. Также некоторые авторы указывают, что во многих случаях обнаружения патологических изменений в печени, вызванных токсинами грибов рода *Aspergillus*, были неотличимы от случаев поражения алкалоидами видов рода *Крестовник* (*Senecio*) как у животных, так и у человека, что привело к необходимости четкой дифференциации подобных поражений [62].

С момента открытия афлатоксинов и до 1992 года, когда афлатоксины были причислены к веществам первого класса канцерогенности, велась активная дискуссия относительно того, какую действительную опасность представляют для человека и животных эти токсины.

После открытия гепатотоксичности афлатоксинов и их возможной канцерогенности делались неоднократные попытки надежно связать случаи онкологических заболеваний печени с повышенным потреблением токсинов в районах, где частота подобных заболеваний превышала среднестатистическую. В некоторых исследованиях предполагалось, что во многих ранних исследованиях не была проведена корректная диагностика случаев смерти на фоне высоких концентраций афлатоксинов в пище [63].

Многочисленные исследования, проведенные в Тайланде, Уганде, Кении, Мозамбике, Свазиленде, показали тесную взаимосвязь между потреблением зараженных афлатоксинами продуктов и частотой встречаемости рака печени [64, 65, 66]. Однако серия параллельных исследований, выполненных на основе обследований значительных по численности популяций с повышенной частотой первичного рака печени, указала, что возможной причиной заболевания является гепатит В [67, 68]. Следствием

этого стал длительный отказ от мнений о наличии у афлатоксинов канцерогенных свойств.

Изучение случаев рака печени, выявленных в южных штатах США, показало определенную связь между уровнем потребления афлатоксинов и частотой случаев рака печени [69]. Лишь в 1986 году в монографии Международного агентства по изучению рака (IARC) афлатоксины были однозначно определены как канцерогенные вещества первого класса опасности [70].

Данное заключение базировалось на нескольких десятках объемных исследований, проведенных по всему миру в десятилетний период, убедительно доказавших роль афлатоксинов в развитии рака печени у животных и людей. В этот же период были обнаружены канцерогенные свойства афлатоксина M1, являющегося метаболитом афлатоксина B1 [71]. В 1992 году, как было сказано ранее, афлатоксины были официально объявлены опасными канцерогенами.

Перспективы исследования микотоксинов. Вместе с изучением микотоксинов возникает интерес к практическому их применению, основанному на том, что некоторые из них могут иметь вполне полезные свойства, несмотря на токсичность.

Например, циклоспорины обладают иммунодепрессивным действием, алкалоиды спорыньи показали эффективность в исследованиях лечения мигреней [72]. Поскольку, как уже было сказано, пенициллин также является микотоксином, не исключено, что некоторые из других токсинов, продуцируемых плесневыми грибами, могут обладать выраженным противомикробным действием. Глиотоксин, метаболит микромицетов родов *Aspergillus*, *Trichoderma*, *Penicillium*, имеет сильное бактериостатическое и бактерицидное действие, в некоторых случаях применяется в качестве фунгицида, поскольку имеет сильно выраженную противогрибковую активность. Также он эффективно подавляет рост палочки Коха. Цитринин высоко активен в отношении грамположительных бактерий, проявляя бактериостатическое действие, однако применение его в качестве антибиотика ограничивается нефротоксичностью.

¹²Поскольку исследование выполнялось до открытия нескольких афлатоксинов, А. Эттл использует это название в единственном числе.

Все эти потенциально полезные свойства сопряжены с токсичностью, однако, данные соединения могут быть отправной точкой в поиске производных или структурных аналогов со сниженной или устраненной токсичностью.

До сих пор остаются не раскрытыми многие аспекты действия микотоксинов, которые сами по себе являются результатом длительной эволюции плесневых грибов и их приспособления к противостоянию с окружающей средой. Не исключено, что список токсинов будет расширяться и далее, а также будут обнаружены новые механизмы их токсического воздействия на организмы.

Достаточно сложно оценить и роль уже известных микотоксинов, поскольку часто симптомы, вызываемые ими, относятся к другим заболеваниям. По оценке китайских исследователей, афлатоксины вызывают от 105 до 142 тысяч случаев рака печени во всем мире ежегодно [73]. Ранее во многих случаях этиология этого заболевания оставалась неизвестной. Согласно отчету группы по эпидемиологии болезней пищевого происхождения ВОЗ, среди всех канцерогенов, встречающихся в пищевых продуктах (диоксины, афлатоксины, цианиды, аллергены арахиса и др.), именно афлатоксины были связаны с самыми высокими значениями показателя DALY¹³ (636869 лет), вызывая рак печени [74].

Научный интерес к теме микотоксинов закономерно растет, начиная со второй половины 20 века, и связан не только с открытием темы для научного сообщества, но и с ростом качества технического обеспечения исследований. В базе данных Dimensions содержится более 176 тысяч публикаций, так или иначе касающихся тематики микотоксинов. При этом более половины из них (87404) издано с 2014 по 2023 год, а самая ранняя относится к 1933 году и описывает попытку лечения псориаза, осложненного микозами различной этиологии, введением некоего микотоксина, на что у 44 из 54 пациентов была стойкая положительная реакция [75].

В ближней и среднесрочной перспективе ожидается рост заражений микотоксинами пищевого и кормового сырья, поскольку мировая тенденция на унификацию рационов населения разных частей света приводит к сокращению видового разнообразия сельскохозяйственных растений, например, к существенному умень-

шению площадей, занятых ранее традиционными масличными культурами и клубневыми растениями (ямсом, маниоккой, бататом) [76]. Снижается также разнообразие культур в развитых странах, например, в США после пика 1960-х годов разнообразие возделываемых культур вернулось к уровню 1870-х годов [77]. Это приводит к высокой однородности заготавливаемого сырья и, как следствие, быстрому распространению микотоксинов, особенно в условиях жаркого и влажного климата многих стран Африки, Юго-Восточной Азии, Южной Америки, где создаются максимально благоприятные условия для роста плесневых грибов.

С другой стороны, несмотря на многолетние усилия по организации системы мониторинга микотоксинов в пищевых продуктах и кормах в разных странах, далеко не всегда удается отслеживать продукты с высоким содержанием токсинов. Некоторые исследования показали, что даже в развитых странах значительная часть населения потребляет продукты питания, содержащие различные микотоксины в дозах, превышающих допустимые суточные нормы потребления. Так, исследования биомаркеров микотоксинов в моче показали, что от 16 до 69 % населения Бельгии, по всей видимости, получает с пищей повышенные дозы дезоксиниваленола [78]. В сходном исследовании, проведенном в Италии, более 40 % обследованных добровольцев также получали суточные дозы DON, превышающие допустимые [79]. Это может быть объяснено ежегодными колебаниями уровней микотоксинов в сырье и пищевых продуктах, когда вследствие недостаточного контроля такие партии попадали в розничную продажу [80]. Помимо этого, в последние годы выявлено множество случаев нахождения дезоксиниваленола в хлебе и продуктах переработки зерна [81].

Токсины грибов рода Alternaria. Отдельно стоит отметить роль микотоксинов, продуцируемых грибами рода *Alternaria*, в котором более 95 видов (из более чем 250) являются факультативными паразитами свыше 4000 видов растений, включая сельскохозяйственные культуры, и продуцентами в общей сложности более 70 различных токсинов [82]. В структуре заражений зерновых грибы *Alternaria* часто занимают доминирующее положение, вызывая до 80 % всех поражений (как индивидуально, так и совместно с другими грибами) [83].

¹³DALY (The disability-adjusted life year) – показатель, разработанный при содействии ВОЗ в 1990-х годах, показывающий общее бремя болезней, выраженное в количестве лет, потерянных из-за плохого состояния здоровья или смерти исследуемой группой населения.

К настоящему времени лишь для небольшой части из них дано полное химическое описание, включая структурные формулы [84]. Отдельные токсины грибов *Alternaria* также обнаружены у некоторых грибов родов *Penicillium*, *Phoma*, *Pyricularia* и других [85].

Впервые токсический эффект метаболитов грибов *Alternaria* был показан в 1973 году – это цитотоксическое, фетотоксическое (воздействие на плод) и тератогенное действие [86]. В 2007 году было обнаружено генотоксическое действие токсинов *Alternaria* и вызываемое ими повреждение ДНК, причем токсическое действие сохранялось при крайне малых концентрациях (от 1 мкМ) [87, 88]. Кроме того, токсины оказывали влияние на репродукцию животных и их онтогенез.

Обнаружение и исследование токсинов этой группы осложняется их обычно невысокими концентрациями, в которых они присутствуют в пораженных объектах и действуют на организм животных и человека. Практически единственным способом их анализа в настоящее время остается метод жидкостной хроматографии с масс-спектрометрическим детектированием, что делает работу по обнаружению этих токсинов существенно более дорогой, нежели многих других, для которых часто применим метод ИФА. Тем не менее, в последние годы отмечено начало разработок таких тест-систем и для некоторых токсинов грибов *Alternaria* [89].

Микотоксины остаются объектом пристального внимания контролирующих органов и исследователей, о чем говорит и стабильный рост числа публикаций, и расширение методик их определения в различных матрицах. Это в свою очередь позволяет выявлять всё больше случаев заражения и предотвращать отравления ими как сельскохозяйственных животных, так и людей.

Заключение. Прямое или косвенное изучение микотоксинов началось во второй половине 19 века, когда были получены первые сведения о том, что именно плесневые грибы являются источником повышенной токсической опасности для животных и человека. Тем не менее, еще в начале 20 века выдающиеся микробиологи своего времени утвер-

ждали, что нет достаточных доказательств того, что продукты питания, пораженные плесневыми грибами, вызывают заболевания¹⁴.

Только более глубокие исследования позволили убедительно доказать, что токсины, вызывающие самые разнообразные заболевания, являются метаболитами плесневых грибов.

История изучения микотоксинов естественным образом связана с сельскохозяйственной деятельностью, где их патогенные свойства проявлялись максимально ярко. Истинная природа таких поражений людей и животных длительное время оставалась не ясна, даже в тех случаях, когда прямая связь между ними и наличием в еде или кормах плесневых грибов была установлена.

Для микотоксинов характерна схема открытия, в которой установление факта токсического действия на домашних и сельскохозяйственных животных приводил к вопросам о влиянии этих токсинов на здоровье человека, а для многих токсинов это был единственный путь к их обнаружению и описанию. Это, однако, не помешало до открытия действующих веществ установить особенности развития интоксикаций и выработать многие эффективные меры их предотвращения или лечения, используемые до сих пор.

С другой стороны, открытия новых токсинов продолжают по мере роста аналитической вооруженности и развития методов анализа, способных работать с количествами обнаруживаемых веществ на уровне нанограммов и долей нанограмма на грамм пробы. Это позволяет сделать предположение, что будут обнаружены и другие токсины, которые в настоящее время не могут быть обнаружены ввиду их малых количеств и неизвестного пока еще токсического действия.

Важным направлением исследований является изучение синергетических эффектов микотоксинов, что ранее оставалось мало исследованным ввиду их сложности.

Таким образом, микотоксины – обширная и неоднородная группа вторичных метаболитов плесневых грибов (в расширенном понимании – грибов вообще) – остаются важным с практической точки зрения объектом изучения разных научных направлений.

¹⁴Утверждение содержится в работе выдающегося микробиолога, сооснователя Института пищевых технологов (IFT) и научного журнала “Food research” (ныне – Journal of Food Science) Фреда Таннера (Tanner F. W. The Microbiology of Foods. Twin City Printing, Champaign, Ill., 1932, p. 669).

References

1. Raistrick H., Smith G. Anti-bacterial substances from moulds. Part I. Citrinin, a metabolic product of *Penicillium citrinum* Thom. Chem. Ind. London. 1941;60:828-883.
2. Levinson H., Levinson A. Control of stored food pests in the ancient Orient and classical antiquity. Journal of Applied Entomology. 1998;122(1-5):137-144. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1439-0418.1998.tb01475.x>
3. Miller J. D. Mycotoxins in Food and Feed: A Challenge for the Twenty-First Century. In: Biology of Microfungi. Part: Fungal Biology. Springer, Cham, 2016. pp. 469-493. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-29137-6_19
4. Barger G. Ergot and Ergotism: A Monograph Based on the Dohme Lectures Delivered in Johns Hopkins University, Baltimore. JAMA. 1932;98(25):2235. DOI: <https://doi.org/10.1001/jama.1932.02730510061033>
5. Krska R., Crews C. Significance, chemistry and determination of ergot alkaloids: A review. Food Additives & Contaminants: Part A. 2008;25(6):722-731. DOI: <https://doi.org/10.1080/02652030701765756>
6. Menzies J. G., Turkington T. K. An overview of the ergot (*Claviceps purpurea*) issue in western Canada: challenges and solutions. Canadian Journal of Plant Pathology. 2015;37(1):40-51. DOI: <https://doi.org/10.1080/07060661.2014.986527>
7. Van Dongen P. W. J., de Groot A. N. J. A. History of ergot alkaloids from ergotism to ergometrine. European Journal of Obstetrics & Gynecology and Reproductive Biology. 1995;60(2):109-116. DOI: [https://doi.org/10.1016/0028-2243\(95\)02104-Z](https://doi.org/10.1016/0028-2243(95)02104-Z)
8. Paulitzky F. Pulvis ad partum aus dem Mutterkorn (Pulvis ad partum from secale). Neues Magazin für Ärzte. 1787;9:44. URL: <https://www.digitale-sammlungen.de/en/view/bsb10083831?page=50,51>
9. Lee M. R. The history of ergot of rye (*Claviceps purpurea*) I: from antiquity to 1900. The Journal of the Royal College of Physicians of Edinburgh. 2009;39(2):179-184. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19847980/>
10. Uraguchi K. Mycotoxic origin of cardiac beriberi. Journal of Stored Products Research. 1969;5(3):227-236. DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-474X\(69\)90037-X](https://doi.org/10.1016/0022-474X(69)90037-X)
11. Seventy-third annual meeting of the British Medical Association. British Medical Journal. 1905;2(2339):1086-1116. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2322579/>
12. Rosa C. A. R., Keller K. M., Oliveira A. A., Almeida T. X., Keller L. A. M., Marassi A. C., Kruger C. D., Devesa M. V., Monteiro B. S., Nunes L. M. T., Astoreca A., Cavaglieri L. R., Direito G. M., Eifert E. C., Lima T. A. S., Modernell K. G., Nunes F. I. B., Garcia A. M., Luz M. S., Oliveira D. C. N. Production of citreoviridin by *Penicillium citreonigrum* strains associated with rice consumption and beriberi cases in the Maranhão State, Brazil. Food Additives & Contaminants: Part A. 2010;27(2):241-248. DOI: <https://doi.org/10.1080/19440040903289712>
13. Kushiro M. Historical review of researches on yellow rice and mycotoxigenic fungi adherent to rice in Japan. Mycotoxins. Japanese Association of Mycotoxicology. 2015;65(1):19-23. DOI: <https://doi.org/10.2520/myco.65.19>
14. Ciegler A., Detroy R., Lillehoj E. Patulin, Penicillic Acid, and Other Carcinogenic lactones. 2007.
15. Mansfield M. A., Jones A. D., Kuldau G. A. Contamination of fresh and ensiled maize by multiple *Penicillium* mycotoxins. Phytopathology. 2008;98(3):330-336. DOI: <https://doi.org/10.1094/PHYTO-98-3-0330>
16. Van der Merwe K. J., Steyn P., Fourie L., Scott D. E., Theron J. Ochratoxin A, a Toxic Metabolite produced by *Aspergillus ochraceus* Wilh. Nature. 1965;205(4976):1112-1113. DOI: <https://doi.org/10.1038/2051112a0>
17. Shotwell O. L., Hesseltine C. W., Goulden M. L. Ochratoxin A: Occurrence as Natural Contaminant of a Corn Sample. Applied Microbiology. 1969;17(5):765-766. DOI: <https://doi.org/10.1128/am.17.5.765-766.1969>
18. Van Walbeek W., Scott P., Harwig J., Lawrence J. *Penicillium viridicatum* Westling: a new source of ochratoxin A. Canadian Journal of Microbiology. 1969;15(11):1281-1285. DOI: <https://doi.org/10.1139/m69-232>
19. Goliński P., Grabarkiewicz-Szczesna J. The 1st detected cases of ochratoxin A residues in human blood in Poland. Roczniki Państwowego Zakładu Higieny. 1985;36(5):378-381. URL: <https://europepmc.org/article/MED/3835672>
20. Grollman A. P., Jelaković B. Role of environmental toxins in endemic (Balkan) nephropathy. Journal of the American Society of Nephrology. 2007;18(11):2817-2823. DOI: <https://doi.org/10.1681/ASN.2007050537>
21. Аксенов И. В., Седова И. Б., Тутельян В. А. Загрязнение продуктов детского питания охратоксином А. Вопросы Питания. 2015;84(5):76-81. Режим доступа: https://www.voprosy-pitaniya.ru/ru/articles_diet/391.html?SSr=280134b2fa13ffffff27c_07e709060d1c30-249d
Aksenov I. V., Sedova I. B., Tutelyan V. A. Contamination of baby foods with ochratoxin A. *Voprosy Pitaniya* = Problems of Nutrition. 2015;84(5):76-81. (In Russ.). URL: https://www.voprosy-pitaniya.ru/ru/articles_diet/391.html?SSr=280134b2fa13ffffff27c_07e709060d1c30-249d
22. Чалый З. А., Киселева М. Г., Седова И. Б., Тутельян В. А. Микотоксины в специях, потребляемых в России. Вопросы Питания. 2023;92(2):26-34. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2023-92-2-26-34> EDN: SYRTHM
Chalyy Z. A., Kiseleva M. G., Sedova I. B., Tutelyan V. A. Mycotoxins in spices consumed in Russia. *Voprosy Pitaniya* = Problems of Nutrition. 2023;92(2):26-34. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2023-92-2-26-34>

23. Mains E. B., Curtis P. B. Scab of small grains and feeding trouble in Indiana in 1928. *Proceedings of the Indiana Academy of Science*. 1929;39:101-110.
24. Наумов Н. А. Пьяный хлеб. Наблюдения за несколькими видами рода *Fusarium*. Труды бюро по микологии и фитопатологии ученого комитета. Петроград, 1916. 216 с.
Naumov N. A. Wheat scab. Observations on several species of the genus *Fusarium*. *Proceedings of the Bureau of Mycology and Phytopathology of the Scientific Committee*. Petrograd, 1916. 216 p.
25. Пронишева Л. Л. Фузариоз пшеницы в Азово-Черноморском крае в 1934 г. и оценка его вредности. *Защита растений*. 1935;(9):129-137.
Pronicheva L. L. *Fusarium* of wheat in the Azov-Black Sea region in 1934 and assessment of its harmfulness. *Zashchita rasteniy*. 1935;(9):129-137. (In Russ.).
26. Абрамов И. Н. Болезни сельскохозяйственных растений Дальнего Востока. Хабаровск, 1938. 292 с.
Abramov I. N. Diseases of agricultural plants of the Far East. Khabarovsk, 1938. 292 p.
27. Schroeder H., Christensen J., Christensen J., Platz-Christensen J. J. Factors affecting resistance of Wheat to scab caused by *Gibberella zeae*. *Phytopathology*. 1963;53:831-838.
URL: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19641100439>
28. Левитин М. М., Мироненко Н. В. Структура и ареалы популяций фитопатогенных грибов. *Биосфера*. 2016;8(2):216-225. Режим доступа: <http://21bs.ru/index.php/bio/article/view/245/125>
Levitin M. M., Mironenko N. V. The structures and areals of populations of phytopathogenic fungi. *Biosfera*. 2016;8(2):216-225. (In Russ.). URL: <http://21bs.ru/index.php/bio/article/view/245/125>
29. Монастырский О. А., Алябьева Н. Н., Ефременко Е. А., Кузнецова Е. В., Стрелкова Т. Г., Свирелис Л. В. Роль токсинообразующих видов грибов и микотоксинов в снижении биологической полноценности зерна злаковых культур. *Наука Кубани*. 2008;(3):40-46. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23760384> EDN: TZYQZF
Monastyrskiy O. A., Alyabieva N. N., Efremenko E. A., Kuznetsova E. V., Strelkova T. G., Svirelis L. V. Role of toxin-producing fungi and mycotoxins in reducing grain crops biological value. *Nauka Kubani = Science of Kuban*. 2008;(3):40-46. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23760384>
30. Yoshizawa T. Thirty-five Years of Research on Deoxynivalenol, a Trichothecene Mycotoxin: with Special Reference to Its Discovery and Co-occurrence with Nivalenol in Japan. *Food Safety*. 2013;1(1):2013002.
DOI: <https://doi.org/10.14252/FOODSAFETYFSCJ.2013002>
31. Pullar E. M., Lerew W. M. Vulvovaginitis of Swine. *Australian Veterinary Journal*. 1937;13(1):28-31.
DOI: <https://doi.org/10.1111/J.1751-0813.1937.TB01134.X>
32. Stob M., Baldwin R. S., Tuite J., Andrews F. N., Gillette K. G. Isolation of an Anabolic, Uterotrophic Compound from Corn infected with *Gibberella zeae*. *Nature*. 1962;196(4861):1318.
DOI: <https://doi.org/10.1038/1961318a0>
33. Urry W., Wehrmeister H., Hodge E., Hidy P. The structure of zearalenone. *Tetrahedron Lett*. 1966;7(27):3109-3114. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0040-4039\(01\)99923-X](https://doi.org/10.1016/S0040-4039(01)99923-X)
34. Szuets P., Mesterhazy A., Falkay G., Bartok T. Early telarche symptoms in children and their relations to zearalenon contamination in foodstuffs. *Cereal Research Communication*. 1997;25:429-436.
DOI: <https://doi.org/10.1007/BF03543747>
35. Рубинштейн Ю. И., Лясс Л. Г. Об этиологии алиментарно-токсической алейкии (септической ангины). *Гигиена и санитария*. 1948;(7):35-40.
URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ob-etologii-alimentarno-toksicheskoy-aleykii-septicheskoy-anginy>
Rubinshteyn Yu. I., Lyass L. G. On the etiology of alimentary-toxic aleukia (septic tonsillitis). *Gigiena i sanitariya = Hygiene and Sanitation*. 1948;(7):35-40. (In Russ.).
URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ob-etologii-alimentarno-toksicheskoy-aleykii-septicheskoy-anginy>
36. Ляшенко И. Э., Авшистер О. Д. Участие ученых и врачей Оренбуржья в борьбе с алиментарно-токсической алейкией. *Интеллект. Инновации. Инвестиции*. 2013;(1):137-139.
Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19028840> EDN: QAKPSP
Lyashenko I. E., Avshister O. D. Scientists and doctors of orenburzhye struggling against alimentary-toxic aleukia. *Intellekt. Innovatsii. Investitsii = Intellect. Innovations. Investments*. 2013;(1):137-139. (In Russ.).
URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19028840>
37. Рубинштейн Ю. И. Новое в области изучения микотоксикозов и их профилактики. *Гигиена и санитария*. 1961;(1):86-90.
Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/novoe-v-oblasti-izucheniya-mikotoksikozov-i-ih-profilaktiki>
Rubinshteyn Yu. I. New in the field of study of mycotoxicoses and their prevention. *Gigiena i sanitariya = Hygiene and Sanitation*. 1961;(1):86-90. (In Russ.).
URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/novoe-v-oblasti-izucheniya-mikotoksikozov-i-ih-profilaktiki>

38. Олифсон Л. Е. Токсические вещества, выделенные из злаковых структур, перезимовавших в поле, и их химическая природа. Вестник Чкаловского отделения Всесоюзного химического общества им. Д. И. Менделеева. 1957;(7):21-35.

Olifson L. E. Toxic materials isolated from cereals overwintered in the field and their chemical nature. *Vestnik Chkalovskogo otdeleniya Vsesoyuznogo khimicheskogo obshchestva im. D. I. Mendeleeva*. 1957;(7):21-35. (In Russ.).

39. Ефремов В. В. Алиментарно-токсическая алейкия (Септическая ангина). Гигиена и санитария. 1944;(7-8):18-25.

Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/alimentarno-toksicheskaya-aleykiya-septicheskaya-angina>

Efremov V. V. Alimentary-toxic aleukia (Septic sore throat). *Gigiena i sanitariya* = Hygiene and Sanitation. 1944;(7-8):18-25. (In Russ.).

URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/alimentarno-toksicheskaya-aleykiya-septicheskaya-angina>

40. Саркисов А. Х. Метод определения ядовитости перезимовавших в поле зерновых культур. Гигиена и санитария. 1944;(9):19-22. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/metod-opredeleniya-yadovitosti-perezimovavshih-v-pole-zernovyh-kultur>

Sarkisov A. Kh. Method for determining the toxicity of grain crops overwintered in the field. *Gigiena i sanitariya* = Hygiene and Sanitation. 1944;(9):19-22. (In Russ.). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metod-opredeleniya-yadovitosti-perezimovavshih-v-pole-zernovyh-kultur>

41. Gilgan M. W., Smalley E. B., Strong F. M. Isolation and partial characterization of a toxin from *Fusarium tricinum* on moldy corn. *Archives of Biochemistry and Biophysics*. 1966;114(1):1-3.

DOI: [https://doi.org/10.1016/0003-9861\(66\)90297-9](https://doi.org/10.1016/0003-9861(66)90297-9)

42. Bamburgh J. R., Riggs N. V., Strong F. M. The structures of toxins from two strains of *Fusarium Tricinum*. *Tetrahedron*. 1968;24(8):3329-3336. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0040-4020\(01\)92631-6](https://doi.org/10.1016/S0040-4020(01)92631-6)

43. Butler T. Notes on a Feeding Experiment to Produce Leucoencephalitis in a Horse, with Positive Results. *The Journal of comparative medicine and veterinary archives*. 1902;23(8):498-501.

URL: <https://europepmc.org/backend/ptpmrender.fcgi?accid=PMC9336278&blobtype=pdf>

44. Biester H. E., Schwarte L. H., Reddy C. H. Further Studies on Moldy Corn Poisoning (Leucoencephalomalacia) in Horses. *Veterinary Medicine*. 1940;35:636-639.

URL: <https://eurekamag.com/research/013/386/013386626.php>

45. Schwarte L. H., Biester H. E., Murray C. A disease of horses caused by feeding moldy corn. *Journal of the American Veterinary Medical Association*. 1937;90:76-85.

46. Wilson B. J., Maronpot R. R. Causative fungus agent of leucoencephalomalacia in equine animals. *Veterinary Record*. 1971;88(19):484-486. DOI: <https://doi.org/10.1136/vr.88.19.484>

47. Cole R., Kirksey J., Cutler H., Doupnik B., Peckham J. Toxin from *Fusarium moniliforme*: Effects on Plants and Animals. *Science*. 1973;179(4080):1324-1326. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.179.4080.1324>

48. Gelderblom W., Jaskiewicz K., Marasas W., Thiel P., Horak R., Vleggaar R., Kriek N. P. Fumonisin – novel mycotoxins with cancer-promoting activity produced by *Fusarium moniliforme*. *Applied and Environmental Microbiology*. 1988;54(7):1806-1811. DOI: <https://doi.org/10.1128/aem.54.7.1806-1811.1988>

49. Laurent D., Lanson M., Goasdoue N., Kohler F., Pelligrin F., Platzer N. Shedy of macrofusine, a toxin isolated from maize as infested by *Fusarium moniliforme* Sheld, by the ¹H and ¹³C NMR technique. *Analisis*. 1990;18(1):172-179. URL: <https://agris.fao.org/search/en/records/6471cb6d77fd37171a6f874a>

50. Stockmann-Juvala H., Savolainen K. A review of the toxic effects and mechanisms of action of fumonisin B1. *Human & Experimental Toxicology*. 2008;27(11):799-809. DOI: <https://doi.org/10.1177/0960327108099525>

51. Voss K. A., Riley R. T. Fumonisin Toxicity and Mechanism of Action: Overview and Current Perspectives. *Food Safety*. 2013;1(1):2013006. DOI: <https://doi.org/10.14252/foodsafetyfscj.2013006>

52. Bartók T., Szécsi A., Szekeres A., Mesterházy A., Bartók M. Detection of new fumonisin mycotoxins and fumonisin-like compounds by reversed-phase high-performance liquid chromatography/electrospray ionization trap mass spectrometry. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*. 2006;20(16):2447-2462.

DOI: <https://doi.org/10.1002/rcm.2607>

53. Blount W. P. Turkey "X" Disease. *Journal of British Turkey Federation*. 1961;9(52):55-58.

54. Sargeant K., O'Kelly J., Carnaghan R., Allcroft R. The assay of a toxic principle in certain groundnut meals. *Veterinary Record*. 1961;73:1219-1223. URL: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19621407118>

55. Coomes T. J., Crowther P. C., Francis B. J., Stevens L. The detection and estimation of aflatoxin in groundnuts and groundnut materials. Part IV. Routine assessment of toxicity due to aflatoxin B1. *Analyst*. 1965;90(1073):492. DOI: <https://doi.org/10.1039/an9659000492>

56. Van der Zijden A. S. M., Koelensmid W. A. A., Boldingh J., Barret C., Ord W., Philp J. *Aspergillus Flavus* and Turkey X Disease: Isolation in Crystalline Form of a Toxin responsible for Turkey X Disease. *Nature*. 1962;195(4846):1060-1062. DOI: <https://doi.org/10.1038/1951060a0>

57. Holzapfel C. W. The isolation and structure of cyclopiazonic acid, a toxic metabolite of penicillium cyclopium westling. *Tetrahedron*. 1968;24(5):2101-2119. DOI: [https://doi.org/10.1016/0040-4020\(68\)88113-X](https://doi.org/10.1016/0040-4020(68)88113-X)

58. Harington J. S., McGlashan N., Bradshaw E., Geddes E., Purves L. A spatial and temporal analysis of four cancers in African gold miners from Southern Africa. *British Journal of Cancer*. 1975;31(6):665-678. DOI: <https://doi.org/10.1038/bjc.1975.114>
59. Oettle A. G. Cancer in Africa, Especially in Regions South of the Sahara. JNCI: Journal of the National Cancer Institute. 1964;33(3):383-439. DOI: <https://doi.org/10.1093/jnci/33.3.383>
60. Stein H., Isaacson C. Cirrhosis of the Liver in Childhood: its Relationship to Protein Malnutrition (Kwashiorkor). *Medical Proceedings*. Johannesburg. 1960;6(1):7-13. URL: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19602901406>
61. Denoix P. Le cancer chez le noir en Afrique française. Ministère de la santé publique, 1957. 179 p. URL: <https://books.google.ru/books?id=NBA0AQAAIAAJ>
62. Higginson J., Keeley K. J. Liver disease in the South African Bantu: a review of liver biopsies from 262 Bantu patients. *Gastroenterology*. 1960;38(3):332-342. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-5085\(60\)80135-7](https://doi.org/10.1016/S0016-5085(60)80135-7)
63. Serck-Hanssen A. Aflatoxin-Induced Fatal Hepatitis? *Archives of Environmental Health: An International Journal*. 1970;20(6):729-731. DOI: <https://doi.org/10.1080/00039896.1970.10665651>
64. Peers F. G., Linsell C. A. Dietary aflatoxins and liver cancer – a population based study in Kenya. *British Journal of Cancer*. 1973;27(6):473-484. DOI: <https://doi.org/10.1038/bjc.1973.60>
65. Shank R. C. Gordon J., Wogan G., Nondasuta A., Subhamani B. Dietary aflatoxins and human liver cancer. III. Field survey of rural Thai families for ingested aflatoxins. *Food and Cosmetics Toxicology*. 1972;10(1):71-84. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0015-6264\(72\)80048-8](https://doi.org/10.1016/S0015-6264(72)80048-8)
66. Linsell C. A., Peers F. G. Aflatoxin and liver cell cancer. *Transactions of The Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene*. 1977;71(6):471-473. DOI: [https://doi.org/10.1016/0035-9203\(77\)90136-5](https://doi.org/10.1016/0035-9203(77)90136-5)
67. Prince A. M., Leblanc L., Krohn K., Masseyeff R., Alpert M. E. S. H. antigen and chronic liver disease. *The Lancet*. 1970;296(7675):717-718. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(70\)91981-1](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(70)91981-1)
68. Prince A. M., Szmunn W., Michon J., Demaille J., Diebolt G., Linhard J., Quenum C., Sankale M. A case/control study of the association between primary liver cancer and hepatitis B infection in Senegal. *International Journal of Cancer*. 1975;16(3):376-383. DOI: <https://doi.org/10.1002/ijc.2910160304>
69. Bruce R. D. Risk assessment for aflatoxin: II. Implications of human epidemiology data. *Risk Analysis*. 1990;10(4):561-569. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.1990.tb00539.x>
70. Overall evaluations of carcinogenicity: an updating of IARC monographs, volumes 1 to 42. IARC Monographs Evaluation of the Carcinogenic Risks Humans. 1987;(7):83-87. URL: <https://publications.iarc.fr/Book-And-Report-Series/Iarc-Monographs-Supplements/Overall-Evaluations-Of-Carcinogenicity-An-Updating-Of-Iarc-Monographs-Volumes-1%E2%80%9342-1987>
71. Hsieh D. P., Cullen J. M., Ruebner B. H. Comparative hepatocarcinogenicity of aflatoxins B1 and M1 in the rat. *Food and Chemical Toxicology*. 1984;22(12):1027-1028. DOI: [https://doi.org/10.1016/0278-6915\(84\)90160-1](https://doi.org/10.1016/0278-6915(84)90160-1)
72. Etzel R. A. Mycotoxins. *JAMA*. 2002;287(4):425-427. DOI: <https://doi.org/10.1001/jama.287.4.425>
73. Liu Y., Chang Ch.-Ch. H., Marsh G., Wu F. Population attributable risk of aflatoxin-related liver cancer: Systematic review and meta-analysis. *European Journal of Cancer*. 2012;48(14):2125-2136. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejca.2012.02.009>
74. Gibb H., Devleeschauwer B., Bolger P., Wu F., Ezendam J., Cliff J., Zeilmaker M., Verger P., Pitt J., Baines J., Adergoke G., Afshari R., Liu Ya., Bokkers B., van Loveren H., Mengelers M., Brandon E., Havelaar A. H., Bellinger D. World Health Organization estimates of the global and regional disease burden of four foodborne chemical toxins, 2010: a data synthesis. *F1000Research*. 2015;4:1393. DOI: <https://doi.org/10.12688/f1000research.7340.1>
75. Berlin. *JAMA*. 1933;100(7):510-511. DOI: <https://doi.org/10.1001/jama.1933.02740070048024>
76. Khoury C., Bjorkman A., Dempewolf H., Ramirez-Villegas J., Guarino L., Jarvis A., Riesenbergh L. H., Struik P. C. Increasing homogeneity in global food supplies and the implications for food security. *PNAS*. 2014;111(11):4001-4006. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1313490111>
77. Hijmans R. J., Choe H., Perlman J. Spatiotemporal Patterns of Field Crop Diversity in the United States, 1870-2012. *Agricultural & Environmental Letters*. 2016;1(1):160022. DOI: <https://doi.org/10.2134/acl2016.05.0022>
78. Heyndrickx E., Sioen I., Huybrechts B., Callebaut A., De Henauw S., De Saeger S. Human biomonitoring of multiple mycotoxins in the Belgian population: Results of the BIOMYCO study. *Environment International*. 2015;84:82-89. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.06.011>
79. Solfrizzo M., Gambacorta L., Visconti A. Assessment of multi-mycotoxin exposure in southern Italy by urinary multi-biomarker determination. *Toxins*. 2014;6(2):523-538. DOI: <https://doi.org/10.3390/toxins6020523>
80. Gratz S. W., Richardson A., Duncan G., Holtrop G. Annual variation of dietary deoxynivalenol exposure during years of different Fusarium prevalence: a pilot biomonitoring study. *Food Additives & Contaminants: Part A*. 2014;31(9):1579-1585. DOI: <https://doi.org/10.1080/19440049.2014.937772>

81. Berthiller F., Maragos C. M., Dall'Asta C. Introduction to Masked Mycotoxins. In book: Masked Mycotoxins in Food. 2015;1-13.
82. Thomma B. P. H. J. Alternaria spp.: from general saprophyte to specific parasite. Molecular Plant Pathology. 2003;4(4):225-236. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1364-3703.2003.00173.x>
83. Монастырский О. А., Кузнецова Е. В., Свирелис Л. В., Стрелкова Т. Г., Ефременко Е. А., Алябьева Н. Н. Влияние токсинообразующих видов грибов и микотоксинов на физиологические свойства зерна высокопродуктивных сортов пшеницы. Наука Кубани. 2007;(3):27-32.
Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23822605> EDN: UBIBKJ
- Monastyrskiy O. A., Kuznetsova E. V., Svirelis L. V., Strelkova T. G., Efremenko E. A., Alyab'eva N. N. The influence of toxinogenic fungi and micotoxins on the grain of highly-productive wheat varieties. *Nauka Kubani* = Science of Kuban. 2007;(3):27-32. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23822605>
84. Barkai-Golan R. Alternaria Mycotoxins. In book: Mycotoxins in Fruits and Vegetables. 2008. pp. 185-203. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374126-4.00008-5>
85. Bräse S., Encinas A., Keck J., Nising C. F. Chemistry and biology of mycotoxins and related fungal metabolites. Chemical Reviews. 2009;109(9):3903-3990. DOI: <https://doi.org/10.1021/cr050001f>
86. Pero R., Posner H., Blois M., Harvan D., Spalding J. Toxicity of metabolites produced by the «Alternaria». Environmental Health Perspectives. 1973;4:87-94. DOI: <https://doi.org/10.1289/ehp.730487>
87. Pfeiffer E., Eschbach S., Metzler M. Alternaria toxins: DNA strand-breaking activity in mammalian cells in vitro. Mycotoxin Research. 2007;23(3): 152-157. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02951512>
88. Fehr M., Pahlke G., Fritz J., Christensen M., Boege F., Altemöller M., Podlech J., Marko D. Alternariol acts as a topoisomerase poison, preferentially affecting the II α isoform. Molecular Nutrition Food Research. 2009;53(4):441-451. DOI: <https://doi.org/10.1002/mnfr.200700379>
89. Chen A., Mao X., Sun Q., Wie Z., Li J., You Y., Zhao J., Ziang G., Wu Y., Wang L., Li Ya. Alternaria Mycotoxins: An overview of toxicity, metabolism, and analysis in food. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2021;69(28):7817-7830. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c03007>

Сведения об авторе

✉ Артамонов Иван Владимирович, научный сотрудник лаборатории биоэкономики и устойчивого развития, ФГБУН «Вологодский научный центр Российской академии наук», ул. Горького, д. 56-а, г. Вологда, Вологодская обл., Российская Федерация, 160014, e-mail: common@volnc.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6387-4886>, e-mail: iv.artamonov@outlook.com

Information about the author

✉ Ivan V. Artamonov, researcher, the Laboratory of Bioeconomics and Sustainable Development, Vologda Research Center of Russian Academy of Sciences, Gorky st., Vologda region, Russian Federation, 160014, e-mail: common@volnc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6387-4886>, e-mail: iv.artamonov@outlook.com

✉ – Для контактов / Corresponding author

Перспективы использования эндофитных и экстремофильных микроорганизмов в борьбе с фитопатогенами сельскохозяйственных культур (обзор)

© 2023. Е. Р. Фасхутдинова , Ю. В. Голубцова, О. А. Неверова, Т. А. Ларичев, Н. Н. Хорошкина

ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», г. Кемерово, Россия

В годы с острой эпифитотической обстановкой инфекционные заболевания растений вызывают значительные потери урожая. Для обеспечения продуктивности сельскохозяйственных культур используют пестициды – вещества химической природы, защищающие растения от фитопатогенов. Повсеместное применение пестицидов приводит к загрязнению почвенных и водных ресурсов, изменениям в микробиоме, нарушению нормального роста и развития растений. С целью минимизировать антропогенное влияние на территории агропромышленного комплекса и обеспечить защиту культурных растений от биотических стрессов разработаны экологически безопасные аналоги пестицидов химической природы – биопестициды на основе бактерий и грибов (получили большее распространение), а также вирусов. В обзоре на основе анализа 105 научных источников рассмотрены преимущества данных препаратов, описаны перспективные агенты биологического контроля, которые могут быть включены в их состав, а именно эндофитные (колонизируют ткани растений) и экстремофильные (выживают в агрессивных условиях окружающей среды) микроорганизмы. Применение эндофитных микроорганизмов в борьбе с инфекционными заболеваниями растений перспективно за счет их способности оказывать непосредственное влияние на рост сельскохозяйственных культур, в частности на их индуцированную резистентность. Положительный эффект от применения экстремофильных микроорганизмов связан с универсальностью их использования, а именно способностью сохранять эффективность в различных почвенно-климатических условиях.

Ключевые слова: агропромышленность, биопестициды, антагонистическая активность, антимикробная активность, *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Trichoderma*, ферментные комплексы

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ согласно Государственному заданию ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет» (FZSR-2023-0003) в рамках национального проекта «Наука и университеты».

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Фасхутдинова Е. Р., Голубцова Ю. В., Неверова О. А., Ларичев Т. А., Хорошкина Н. Н. Перспективы использования эндофитных и экстремофильных микроорганизмов в борьбе с фитопатогенами сельскохозяйственных культур (обзор). Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2023;24(5):720-738.

DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.5.720-738>

Поступила: 07.07.2023

Принята к публикации: 03.10.2023

Опубликована онлайн: 30.10.2023

Prospects for the use of endophytic and extremophilic microorganisms in the fight against phytopathogens of agricultural crops (review)

© 2023. Elizaveta R. Faskhutdinova , Yulia V. Golubtsova, Olga A. Neverova, Timothy A. Larichev, Natalia N. Khoroshkina

Kemerovo State University, Kemerovo, Russian Federation

During the years with acute epiphytotic conditions, infectious diseases of plants cause significant crop losses. To ensure the productivity of agricultural crops, pesticides are used, that is, substances of chemical nature that protect plants from phytopathogens. Widespread use of pesticides leads to contamination of soil and water resources, changes in the microbiome, disruption of normal plant growth and development. In order to minimize the anthropogenic impact on the territory of the agro-industrial complex and ensure the protection of cultivated plants from biotic stresses, environmentally safe analogues of chemical pesticides have been developed – biopesticides based on bacteria and fungi (have become more widespread), as well as viruses. The review, based on the analysis of 105 scientific sources, examines the advantages of these drugs, describes promising biological control agents that can be included in their composition, namely endophytic (colonize plant tissues) and extremophilic (survive in aggressive environmental conditions) microorganisms. The use of endophytic microorganisms in the fight against infectious diseases of plants is promising due to their ability to have a direct impact on the growth of crops and their induced resistance. The positive effect associated with the use of extremophilic microorganisms is associated with the universality of their use, namely the ability to maintain efficiency in various soil and climatic conditions.

Keywords: agro-industry, biopesticides, antagonistic activity, antimicrobial activity, *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Trichoderma*, enzyme complexes

Acknowledgements: the work was carried out within the framework of the state task with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (FZSR-2023-0003). This state task is funded within the framework of the national project "Science and Universities".

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

For citation: Faskhutdinova E. R., Golubtsova Yu. V., Neverova O. A., Larichev T. A., Khoroshkina N. N. Prospects for the use of endophytic and extremophilic microorganisms in the fight against phytopathogens of agricultural crops (review). *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2023;24(5):720-738. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.5.720-738>

Received: 07.07.2023

Accepted for publication: 03.10.2023 Published online: 30.10.2023

Продукты сельскохозяйственного производства являются важным звеном в обеспечении продовольственной безопасности. Согласно данным FAO, доля энергии, получаемой человеком из злаков, корнеплодов и клубнеплодов, составляет более 45 % от общего числа потребляемых продуктов питания¹. В то же время сельскохозяйственные культуры подвержены различным грибным болезням, а также заболеваниям бактериальной природы, которые способны значительно снизить их продуктивность. В годы с острой эпифитотической обстановкой потери урожая могут достигать 50-60 % [1].

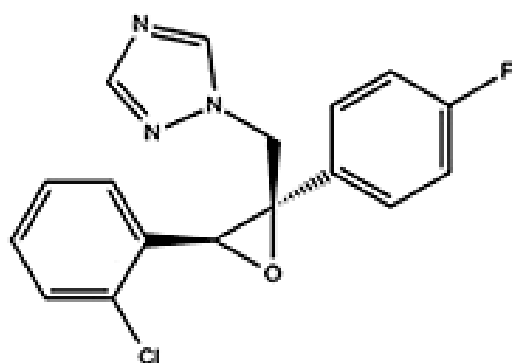
Для борьбы с фитопатогенами сельскохозяйственных культур используются химические средства защиты – пестициды. В течение последних 30 лет агропромышленный комплекс значительно увеличивал нормы их применения. В 2019 году расход данных препаратов оценивали в 4,16 млн тонн [2]. На данный момент около 1/3 всей продукции сельскохозяйственного сектора выращивается с применением пестицидов.

Использование пестицидов оказывает положительное влияние на продуктивность

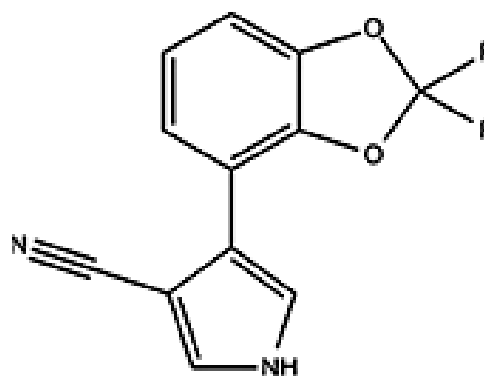
сельскохозяйственных культур и позволяет добиться большего объема выпускаемой продукции, а также надлежащего качества товаров при послеуборочном хранении. Однако, несмотря на очевидные преимущества, пестициды считаются потенциально опасными и токсичными веществами, способными негативно влиять на окружающую среду и здоровье человека [3, 4, 5].

Длительное воздействие пестицидов химического происхождения на организм приводит к отравлениям [6], развитию диабета 2 типа [7], а также различным респираторным и онкологическим заболеваниям [8, 9].

Согласно исследованиям, лишь малая часть используемых в сельском хозяйстве пестицидов достигает целевых организмов (около 0,1 %), большая же часть остается в почвах [10]. Так, около 50 % остаточных пестицидов могут сохраняться на протяжении десятилетия в виде продуктов трансформации. К таким препаратам относят фунгициды эпоксиконазол и флудиоксонил (рис. 1) [11, 12].



Флудиоксонил / Fludioxonil



Эпоксиконазол / Epxiconazole

Рис. 1. Стойкие фунгициды химической природы /

Fig. 1. Persistent chemical fungicides

¹Share of dietary energy from cereals, roots, and tubers. Food Systems Dashboard. 2018. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.foodsystemsdashboard.org/countries/rus#adult-obesity> (дата обращения 21.06.2023)

Накопление в почвах пестицидов в долгосрочной перспективе способствует снижению качества сельскохозяйственных культур. Под действием фотодеградаци, а также химической и биологической деградаци, пестициды и их остатки проникают через корневую систему к остальным частям растения, вызывая негативные процессы: перепроизводство активных форм кислорода, повреждение ДНК, блокировку процесса фотосинтеза и окислительный стресс, что приводит к гибели растений [13].

В исследовании М. Шахид и соавт. (M. Shahid et al.) отмечено токсическое действие на горох посевной (*Pisum sativum* L.) таких фунгицидов, как китазин, гексаконазол и карбендазим. Все они оказывали негативное влияние на культуру. При этом наиболее ярко выраженный эффект отмечен при применении карбендазима, который на сегодняшний день разрешен к использованию на территории РФ. Токсическое действие данного фунгицида заключается в снижении размеров корней, побегов и общего накопления в них сухого вещества на 40-84 % [14]. Отмечается также отрицательное влияние фунгицидов на пищевую ценность и биохимические свойства некоторых культур.

Накапливаясь в почвах, пестициды негативно влияют на плодородие и микробиом. Существует множество исследований, подтверждающих негативное влияние пестицидов на ферментативную активность почв. Так, исследованиями П. Сатапуте и соавт. (P. Satapute et al.) установлено, что фунгицид пропиконазол снижает активность уреазы в течение 1 недели инкубации в количествах 15,0 и 20,0 кг/га. Та же концентрация пестицида ингибировала ферментативную активность фосфатазы после 1 недели инкубации [15].

А. Монкиедие и соавт. (A. Monkiedje et al.) отметили особую чувствительность дегидрогеназной активности к фунгицидам мефеноксам и металаксил, в особенности при длительном их воздействии. Высокие концентрации металаксил (200-1000 мкг/г почвы) снижали активность фермента более чем на 50 % уже на 14 сутки после применения [16].

Активность почвенных ферментов является индикатором биологического равновесия, плодородия и качества почвы [17]. Почвенные ферменты ответственны за круговорот органических веществ, высвобождение неорганических макро- и микроэлементов, способствующих росту растений, а также за процессы

нитрификации и детоксикации ксенобиотиков [17, 18, 19]. Они играют важную роль в циклах углерода (дегидрогеназа и β -глюкозидаза), азота (уреаза), фосфора (фосфатаза) и серы (сульфатаза) [20]. Поэтому снижение ферментативной активности под воздействием пестицидов вызывает серьезные нарушения в процессах почвообразования и падение плодородия почв.

Снижение ферментативной активности на загрязненных пестицидами территориях тесно сопряжено с изменениями, происходящими в микробиоме почв. Многочисленные исследования влияния фунгицидов на микробиом не приходят к однозначному выводу. Например, Б. Фоурниер и соавт. (B. Fournier et al.) отметили, что разрешенные к использованию на территории РФ синтетические фунгициды фосэтил-Al и пропамокарб-гидрохлорид не оказывают значительного влияния на разнообразие почвенных микроорганизмов, однако способны снижать сложность структуры микробного взаимодействия [21]. При этом А. В. Ллойд и соавт. (A. W. Lloyd et al.) установили, что обработка голубики фунгицидом протиоконазол являлась движущим фактором, влияющим на биоразнообразие микромицетов. На обработанных территориях отмечали значительное его снижение. Примечательно, что фунгицид обладал коротким периодом полураспада, за счет чего предполагалось его минимальное воздействие на разнообразие почвенных микроорганизмов. Действие другого фунгицида, рассмотренного в исследовании, оказывало еще более значимое влияние – обработка хлороталонилом привела к изменению структуры не только грибных, но и бактериальных сообществ [22].

В работе А. Катсоула и соавт. (A. Katsoula et al.) отмечены значительные изменения в разнообразии бактерий и грибов на территориях, обработанных фунгицидом ипродион. Исследователи отметили, что применение фунгицида способствовало снижению количества OTU, отнесенных к потенциальным патогенам человека и растений, таким как *Staphylococcus*, *Escherichia-Shigella*, *Corynebacterium* и *Taphrina*. В то же время наблюдали увеличение числа фитопатогенных грибов, принадлежащих к *Nigrospora* и *Puccinia* [23].

Негативное воздействие пестицидов распространяется не только на почвы. Попадая в водоёмы, пестициды ухудшают качество поверхностных и подземных вод [4]. Доказано, что некоторые классы фунгицидов, например

стробилурины, способны оказывать негативное влияние на фауну водоемов за счет митохондриальной токсичности, генотоксичности, имунотоксичности, кардиотоксичности, нейротоксичности и эндокринных нарушений организмов [24].

Нельзя не отметить проблему негативного влияния пестицидов на организм человека. К примеру, токсичная природа пестицидов способна пагубно влиять на организм беременных женщин [25]. Также, попадая в организм человека и теплокровных животных, пестициды могут вызывать нарушения функционирования центральной нервной системы и ряда жизненно важных органов. Ряд исследований доказал прямую зависимость между воздействием пестицидов и развитием опухолей в организме. В частности, пестицид тиаклоприд способствовал гормональному развитию

опухоли в организме крыс [26]. Исследование Н. Е. МцЦарролл и соавт. (N. E. McCarroll et al.) показало, что такой пестицид, как беномил, применяемый для защиты злаковых культур и свёклы от фузариозной снежной плесени, церкоспореллезной гнили корневой шейки, фузариозной корневой гнили и других, является причиной возникновения гепатоцеллюлярных опухолей [27]. Отмечено, что пестицид глифосат, применяемый для защиты зерновых, овощных культур, картофеля и других от сорняков, вызывает нарушение зрительной функции, боли в суставах, тошноту, головную боль, повышение артериального давления и др. [28]. Обнаружена прямая зависимость между воздействием глифосата и развитием лейкемии [29]. В таблице 1 приведены примеры вредного воздействия некоторых классов как синтетических, так и органических пестицидов [30].

Таблица 1 – Вредные воздействия пестицидов /
Table 1 – Harmful effects of pesticides

Класс пестицидов / Pesticide class	Препараты, содержащие данный класс пестицидов. Производитель / Preparations containing this class of pesticides. Manufacturer	Вредное воздействие / Harmful effects
Пиретроиды / Pyrethroids	Альфа-Ципи (ООО «Агрорус и Ко»); Бифас (ООО «Альфакхимгрупп») / Al'fa-Tsipi (ООО «Agrorus i Ko»); Bifas (ООО «Al'fakhimgrupp»)	Нарушение нервной системы, кашель, учащенное дыхание и боль в груди / Nervous system disorder, cough, rapid breathing and chest pain
Карбаматы / Carbamates	Ланнат (ООО «Дюпон Наука и Технологии») / Lannat (ООО «Dyupon Nauka i Tekhnologii»)	Нарушение нервной системы, слабость, тошнота / Nervous system disorder, weakness, nausea
Неоникотиноиды / Neonicotinoids	Конфидор Экстра («ООО Байер КропСайенс АГ (Германия)»; Моспилан (Ниппон Сода Ко.) / Konfidor Ekstra («ООО Bayer KropSayens AG (Germany)»; Mospilan (Nippon Soda Co.)	Возникновение аллергии, появление язв / The occurrence of allergies, the appearance of ulcers
Фосфорорганические соединения / Organophosphorus compounds	Бинадин («ТПК Техноэкспорт»); Медвегон (ЗАО «НКФ «РЭТ») / Binadin («TPK Tekhnoeksport»); Medvegon (ZAO «NKF «RET»)	Головная боль, мышечная усталость, насморк, тошнота / Headache, muscle fatigue, runny nose, nausea

Таким образом, использование синтетических пестицидов в агропромышленном комплексе оказывает негативное влияние на экологию, снижает качество сельскохозяйственных культур, ухудшает плодородие почв, является угрозой биологическому разнообразию как почвенных, так и водных ресурсов, а также может нанести вред организму человека.

Последние десятилетия характеризуются появлением множества исследовательских проектов, направленных на защиту сельскохозяйственных культур и растений от инфекционных заболеваний и вредителей без исполь-

зования пестицидов синтетической природы [31]. Разработанный в ЕС Европейский регламент по пестицидам № 1107/2009 поощрил страны использовать более безопасные аналоги пестицидов, не оказывающих сильного негативного воздействия на окружающую среду. Данный регламент вступил в силу 14 июня 2011 г. и заменил Директиву 91/414/ЕЕС. Он применяется к веществам, а также микроорганизмам, оказывающим общее либо специфическое воздействие против вредных организмов, растений, либо частей растений. Накопленная научная база, а также поощрение разработок на госу-

дарственном уровне привело к созданию технологий производства биопестицидов и способов их применения. Актуальным направлением исследований является использование эндофитных и экстремофильных микроорганизмов в качестве компонентов биопестицидов.

Цель обзора – обосновать целесообразность разработок биопестицидов, рассмотреть перспективные агенты биологического контроля, которые могут быть включены в их состав, а именно эндофитные (колонируют ткани растений) и экстремофильные (выживают в агрессивных условиях окружающей среды) микроорганизмы.

Материал и методы. Выполнен аналитический обзор 107 научных литературных источников на английском и русском языках. Поиск ограничен рецензируемыми статьями в академических журналах, включает исследовательские и обзорные статьи, соответствующие тематике изучения. В обзор не включались материалы конференций и пр. Для выявления и отбора научных статей поиск в библиографических информационных базах Scopus, Web of Science и Elibrary осуществили по следующим ключевым словам: агропромышленность, биопестициды, антагонистическая активность, антимикробная активность, *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Trichoderma*, ферментные комплексы.

В качестве временных рамок для настоящего обзора научных статей принят период 2016-2023 гг. Научные статьи, опубликованные ранее 2016 г., включали в данный обзор только при отсутствии более новых публикаций по конкретному аспекту исследуемой темы.

Основная часть. Понятие биопестицидов. Соединения животного, растительного и микробного происхождения используются для борьбы с фитопатогенами сельскохозяйственных культур [32].

Применение данных веществ набирает популярность, так как по сравнению с химическими средствами защиты растений они обладают рядом преимуществ:

1. Действие селективно и не оказывает негативного влияния на нецелевые организмы [33]. Пестициды биологической природы воздействуют исключительно на инфекционные заболевания растений, не приводя к гибели насекомых (в т. ч. опылителей) и животных [34].

2. Низкая токсичность. За счет данного свойства пестициды можно применять в любом

промежутке выращивания сельскохозяйственных культур, в том числе незадолго до сбора урожая [35].

3. Отсутствие биоаккумуляции и быстрое разложение в природных условиях [36]. В составе биопестицидов отсутствуют синтетические вещества, за счет чего они не способствуют загрязнению окружающей среды [37]. Метаболиты микроорганизмов, как правило, легко поддаются разложению, а численность микроорганизмов контролируется путем естественных процессов, протекающих в микробиоме [38].

4. Снижение вероятности развития резистентности у фитопатогенов [33]. Многие биопестициды воздействуют на патоген путем мобилизации индуцированной резистентности, которая представляет собой естественную обусловленную генами устойчивость растений. За счет этого сельскохозяйственная культура самостоятельно справляется с фитопатогеном без применения антимикробных веществ, что снижает вероятность развития резистентности к препарату у возбудителей заболеваний [39].

Данные преимущества обуславливают возможность применения биопестицидов в качестве современного экологичного средства защиты растений. Биопестициды являются лучшей альтернативой химическим пестицидам, поскольку их использование минимизирует негативное воздействие на окружающую среду, включая здоровье человека. В связи с этим они играют решающую роль в эволюции современных методов устойчивого развития сельского хозяйства.

Нельзя не отметить хоть и не значительный на данный момент, но быстрорастущий рынок биопестицидов. Начиная с 2017 г., отмечается рост производства (рис. 2).

Согласно другим данным, доля биопестицидов среди средств защиты растений достигает 10 % [41]. За последний год продажа биопестицидов составила 7 млрд долларов, а в 2025 году эта сумма превысит 10 млрд долларов при условии ежегодного темпа прироста 17 %. Согласно данным, представленным компанией Клеффманн Групп (Kynetec), прирост мирового рынка химических пестицидов составил всего 1 %, достигнув 56 млрд долларов в основном за счет растущего рынка стран Латинской Америки и Азии. При этом европейский рынок химических пестицидов находится в стадии стагнации, постепенно сокращаясь благодаря курсу «зеленой экономики» и тренду на сохранение окружающей среды.

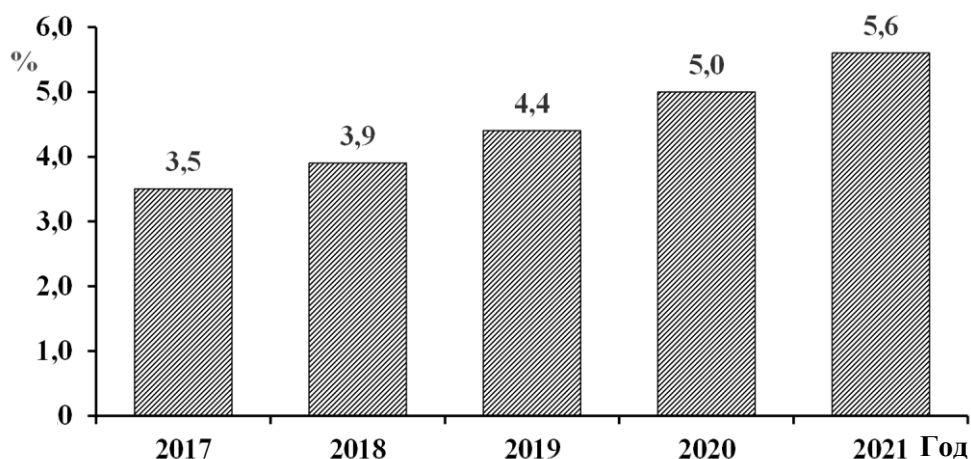


Рис. 2. Мировой рынок биопестицидов [40] /
Fig. 2. Global biopesticide market [40]

Микробные продукты являются важным и быстрорастущим сегментом мирового рынка (рис. 3). Они производятся в основном мелкими промышленными предприятиями, специализиру-

ющимися на создании продуктов для борьбы с различными вредителями. Однако всё чаще технологии производства биопестицидов внедряются на средние и крупные предприятия.

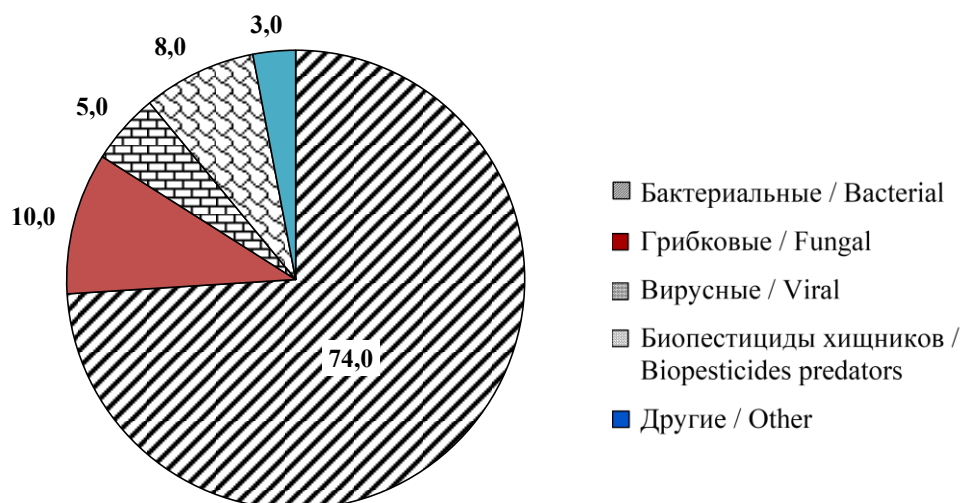


Рис. 3. Рынок биопестицидов микробного происхождения, % [42] /
Fig. 3. Market of biopesticides of microbial origin, % [42]

Важное место отводится биофунгицидам, занимающим свыше половины объема всего рынка биопрепаратов. Не меньшее значение имеют биоинсектициды, доля которых ограничивается 1 %, что свидетельствует о необходимости развития данного сегмента (рис. 4).

В таблице 2 приведен список биопестицидов, представленных на рынке РФ, а также микроорганизмы, на основе которых созданы данные биопестициды.

К предприятиям, лидирующим в области разработок биопестицидов, относят: научно-

внедренческое предприятие БашИнком, группу компаний «Агробиотехнология», филиалы ФГБУ «Россельхозцентр», ООО ПО «Сиббиофарм», ООО «Биотехагро», ООО СХП «Нива», «Бионоватик» и другие. Основным направлением сбыта биопестицидов являются южные регионы России (Краснодарский край, Ставропольский край, Воронежская область и др.). Однако, согласно данным Союза органического земледелия², только 2 % сельхозугодий РФ заинтересованы во внедрении биологической системы защиты растений.

² Союз органического земледелия. Официальный сайт.

URL: <https://soz.bio/events/uroven-vnedreniya-agrobiotekhnologiy/?ysclid=lna6ax295i93419768> (дата обращения: 28.09.2023).

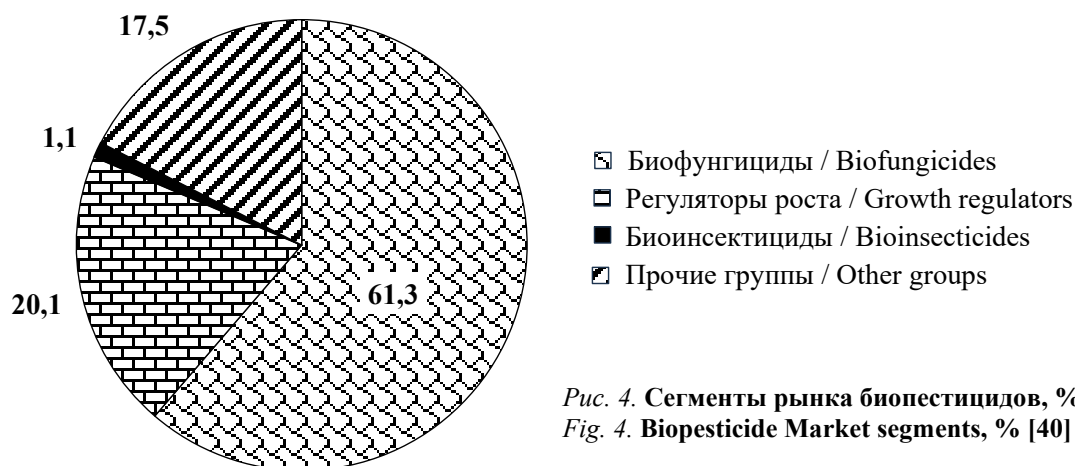


Рис. 4. Сегменты рынка биопестицидов, % [40] /
Fig. 4. Biopesticide Market segments, % [40]

Таблица 2 – Биопестициды, используемые на территории РФ /
Table 2 – Biopesticides used in the territory of the Russian Federation

Микроорганизм / Microorganism	Биопестицид / Biopesticide
Биоинсектицид / Bioinsecticide	
<i>Beauveria Bassiana</i>	Зеленый барьер / Zelenyy bar'er
<i>Metarhizium anisopliae</i>	Метаризин / Metarizin
<i>Lecanicillium lecanii</i>	Биоверт / Biovert
<i>Bacillus thuringiensis</i>	Лепидосид, Битоксибациллин, Биостоп / Lepidotsid, Bitoksibatsillin, Biostop
Вирусы / Viruses	ФермоВирин, Мадекс Твин, Хеликовекс / Fermovirin, Madeks Twin, Khelikoveks
Биофунгицид / Biofungicide	
<i>Bacillus subtilis</i>	БисолбиСан, Алирин-В, Бактофит, Гамаир, Витаплан, Фитоспорин / BisolbiSan, Alirin-V, Baktofit, Ga-mair, Vitaplan, Fitosporin
<i>Pseudomonas fluorescens</i>	Ризоплан / Rizoplan
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i>	БФТИМ КС-2, Оргамика С / BFTIM KS-2, Orgamika S
<i>Trichoderma harzianum</i>	Трихоцин, ТрихоПлант / Trikhotsin, TrikhoPlant
<i>Pseudomonas aureofaciens</i>	Псевдобактерин / Pseudobakterin

Биопестициды микробного происхождения. Микроорганизмы-продуценты биопестицидов. Для борьбы с инфекционными заболеваниями сельскохозяйственных культур наиболее перспективным является использование микробных биопестицидов на основе бактерий, грибов, вирусов и др. Данные препараты набирают популярность и уже составляют большую часть рынка биопестицидов [43].

Наиболее часто в качестве агентов биологического контроля выделяют микроорганизмы следующих родов: *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Trichoderma*. Род *Bacillus* часто встречается в почве и обладает широким генетическим разнообразием. Большинство представителей – спорообразующие, за счет чего способны противостоять экстремальным температурам, кислой реакции почвенной среды, засухе и

дефициту доступных питательных веществ. Виды рода *Bacillus* не только проявляют антагонистическую активность в отношении ряда фитопатогенов, но также способны колонизировать ризосферу и стимулировать рост растений, за счет чего выступают перспективным компонентом биопестицидов [44]. В таблице 3 приведен перечень ряда метаболитов представителей рода *Bacillus*, способных ингибировать развитие фитопатогенов.

Перспективными агентами биоконтроля являются также бактерии рода *Pseudomonas*. Данные микроорганизмы аэробные и грамотрицательные, питаются экссудатами корней, способны колонизировать ризосферу. К метаболитам *Pseudomonas* относят антибиотики, сидерофоры, летучие вещества и внеклеточные ферменты. Представители этого рода способны

конкурировать с другими микроорганизмами и адаптироваться к стрессовым факторам окружающей среды. Они повсеместно распространены в природе и перспективны для исследований за счет способности быстро расти в условиях *in vitro*. В то же время их реже включают в

состав биопестицидов, так как они не способны образовывать споры (в отличие от *Bacillus*), что усложняет их коммерческое использование [51]. Метаболиты рода *Pseudomonas*, проявляющие антагонистическую активность в отношении фитопатогенов, представлены в таблице 4.

Таблица 3 – Действие метаболитов представителей рода *Bacillus* /
Table 3 – The action of metabolites of representatives of the genus *Bacillus*

Продуцент / Producer	Метаболит / Metabolite	Целевой организм / Target organism	Источник / Source
<i>B. subtilis</i> NCIB3610	Бациллин / Bacillene	<i>Mycococcus xanthus</i>	[45]
<i>B. amyloliquefaciens</i>	Диффицидин / Difficidin	<i>Xanthomonas oryzae</i>	[46]
<i>B. subtilis</i> ZJ318	Макролактин / Macrolactins	Метициллин-резистентный <i>Staphylococcus aureus</i> ; <i>Enterococci</i> / Methicillin-resistant <i>Staphylococcus aureus</i> ; <i>Enterococci</i>	[47]
<i>Paenibacillus</i> sp. F6-B70	Паэнимакролидин / Paenimacrolidin	Метициллин-резистентный <i>Staphylococcus aureus</i> / Methicillin-resistant <i>Staphylococcus aureus</i>	[48]
<i>Paenibacillus polymyxa</i>	Полимиксин Е / Polymyxin E	<i>E. amylovora</i> ; <i>Erwinia carotovora</i>	[49]
<i>Paenibacillus polymyxa</i>	Фузарицидины / Fusaricidins	Грибы / Fungi	[50]

Таблица 4 – Действие метаболитов представителей рода *Pseudomonas* /
Table 4 – The action of metabolites of representatives of the genus *Pseudomonas*

Микроорганизм / Microorganism	Действие / Action	Целевой организм / Target organism	Метаболиты / Metabolites	Источник / Source
<i>Pseudomonas chlororaphis</i> M71	Противогрибковая активность / Antifungal activity	<i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>radicis-lycopersici</i> , <i>Seiridium cardinale</i> , <i>Pythium ultimum</i> , <i>Seiridium cardinale</i>	Феназин, летучие соединения / Phenazine, volatile compounds	[52]
<i>Pseudomonas chlororaphis</i> Pa23		<i>Sclerotinia sclerotiorum</i>	HCN, феназин, пирролнитрин / HCN, phenazine, pyrrolnitrine	[53]
<i>Pseudomonas chlororaphis</i> G05		<i>Fusarium graminearum</i>	Пирролнитрин, феназин / Pyrrolnitrine, phenazine	[54]
<i>Pseudomonas chlororaphis</i> R47		<i>Phytophthora infestans</i>	HCN	[55]

Представители рода *Trichoderma* являются многофункциональным грибом, относящимся к семейству *Hypocreaceae* и известным в большом разнообразии экосистем. Данные микроорганизмы широко распространены в сельскохозяйственных, периферийных, лесных, солончаковых и пустынных почвах всех климатических зон [56]. В таблице 5 даны метаболиты представителей рода *Trichoderma*.

Представители данного рода метаболизируют большое количество субстратов, конку-

рируют с другими группами грибов за экологические ниши и питательные вещества, а также производят различные вторичные метаболиты, включая антибиотики. Некоторые виды *Trichoderma* обладают микопаразитарной способностью, что делает их потенциальными агентами биологической борьбы с фитопатогенными грибами. Например, виды *Trichoderma*, такие как *T. harzianum*, могут колонизировать и разрушать устойчивые структуры других фитопатогенных грибов [61].

Таблица 5 – Действие метаболитов рода *Trichoderma* /
Table 5 – The action of metabolites of representatives of the genus *Trichoderma*

Микроорганизм / Microorganism	Действие / Action	Целевой организм / Target organism	Метаболиты / Metabolites	Источник / Source
<i>Trichoderma erinaceum</i>	Противогрибковая активность / Antifungal activity	<i>Pythium ultimum</i>	(Z)-5-амино-5-(1,1,2-тригидроксипута-1,3-диенилокси) пентан-6,7,8,9-тетраол / (Z)-5-amino-5-(1,1,2-trihydroxybuta-1,3-dienyloxy)pentane-6,7,8,9-tetraol	[57]
<i>Trichoderma longibrachiatum</i> EF5		<i>Macrophomina Phaseolina</i>	1,6-ангидро- α -d-глюкопираноза и 5-гептилдигидро-2(3H)-фуранон / 1,6-anhydro- α -d-Glucopyranose and 5-heptyl dihydro-2(3H)-Furanone	[58]
<i>Trichoderma hamatum</i> FB10	Антимикробная активность / Antimicrobial activity	<i>Acidovorax avenae</i> , <i>Erutimacarafavora</i> и <i>Xanthomonas campestris</i>	6-пентил-альфа-пирон / 6-pentyl-alpha-pyrone	[59]
<i>Trichoderma atroviride</i>		<i>Macrophomina Phaseolina</i> и <i>Rhizoctonia solani</i>	5-гидроксиметилфурфурол, 4H-пиран-4-он, 2,3-дигидро-3,5-дигидрокси-6-метил-, фурфурол, гексадекановая кислота, 2-гидрокси-1-(гидроксиметил) этиловый эфир, 1,2-циклопентандион и 2-фуранметанол / 5-hydroxymethylfurfural, 4 H-pyran-4-one, 2,3-dihydro-3,5-dihydroxy-6-methyl-, furfural, hexadecanoic acid, 2-hydroxy-1-(hydroxymethyl) ethyl ester, 1,2-cyclopentanedione and 2-furanmethanol	[60]

Благодаря уникальным свойствам, перспективными продуцентами пестицидов биологической природы также могут являться эндофитные и экстремофильные микроорганизмы.

Эндофитные микроорганизмы. Эндофитные микроорганизмы (эндофиты) – это микроорганизмы, способные колонизировать ткани растений, не вызывая повреждений [62]. Они поселяются в тканях растений в ответ на колебания условий окружающей среды, в том числе на абиотические и биотические стрессы [63]. Наиболее часто эндофиты проникают в растение через поврежденную корневую систему, которая является источником поступления в почву растительных метаболитов, что делает данные участки привлекательными для эндофитов [64].

Эндофиты обладают рядом преимуществ перед микроорганизмами, населяющими ризосферу. Присутствие в тканях растений позволяет эндофитам постоянно контактировать с растительными клетками, а также их метаболитами, в результате чего они оказывают благотворное влияние на растения напрямую [62].

Механизм действия эндофитов не до конца понятен ученым, однако полезные эффекты

эндофитных грибов принято объединять в две группы: защитный эффект, направленный на обеспечение защиты растений от биотических и/или абиотических стрессов; адаптивный эффект [65]. Антагонистическая активность эндофитов в отношении фитопатогенов делает их перспективными агентами биологического контроля.

Защита растений от фитопатогенов характеризуется индивидуальным механизмом в зависимости от эндофита. Наиболее распространенным механизмом является прямой антагонизм *in vitro* против патогенов путем продуцирования вторичных метаболитов, обладающих антимикробными и фунгицидными свойствами [66]. Другим механизмом является конкуренция с патогенами за питательные вещества и пространство. Известно, что непатогенный эндофитный гриб *Fusarium oxysporum*, выделенный из пробкового дуба (*Quercus suber*), подавлял рост штаммов фитопатогена *Verticillium dahliae*, в том числе и за счет конкуренции за питательные вещества и пространство, что подтверждается мицелиальным разрастанием эндофита над колониями патогена [67]. Более подробно механизмы действия эндофитных грибов на патогены растений представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Механизмы действия эндофитных грибов против ряда фитопатогенов /
Table 6 – The mechanism of action of endophytic fungi against a number of phytopathogens

Эндофитный гриб или растение-хозяин / Endophytic fungi or host plant	Фитопатоген / Phytopathogenic	Механизм действия / Mechanism of action	Заключение / Conclusion	Источник / Source
<i>Aspergillus</i> , <i>Botryotina</i> , <i>Colletotrichum</i> , <i>Penicillium</i> и др. / <i>Panax notoginseng</i> Wall.	<i>Mycocentrospora</i> <i>acerina</i> , <i>Fusarium</i> <i>oxysporum</i> , <i>Fusarium</i> <i>solani</i> , <i>Alternaria</i> <i>panax</i> , <i>Phoma herbarum</i>	Продуцирование БАВ / Production BAS	За счет действия БАВ эндофиты обеспечивали защиту растения от болезнетворных организмов / By the action of BAS endophytes protected the plant from pathogens	[68]
<i>Cladosporium</i> <i>cladosporioides</i> / <i>Zygothellum mandavil-</i> <i>lei</i> Hadidi	<i>Pseudomonas syringae</i> , <i>Xanthomonas oryzae</i> , <i>Aspergillus flavus</i> , <i>Fusarium solani</i>	Продуцирование метаболитов антимикробного действия, а именно: 3-фенилпропионовая кислота, 1-ацетил-17-метокси- аспидоспермидин-20-ол, изокла- доспорин, кладоспорин и др. / Production of antimicrobial metab- olites, namely: 3-phenylpropionic acid, 1-acetyl-17-methoxyaspido- spermidin-20-ol, Isocladosporin, Cladosporin, etc.	3-фенилпропионовая кислота является наиболее активным соединением против потенциальных грибковых и бактериальных фитопатогенов / 3-phenylpropionic acid is the most active compound against potential fungal and bacterial phytopathogens	[69]
<i>Cryptosporiopsis</i> sp., <i>Phialocephala</i> <i>sphaeoides</i> или <i>Picea abies</i> L. H. Karst.	<i>Botrytis cinerea</i> , <i>Phytophthora pini</i> , <i>Heterobasidium</i> <i>parviporum</i>	Продуцирование метаболитов антимикробного действия обоими эндофитами / Production of antimicrobial metabolites by both endophytes	<i>P. sphaeoides</i> оказывал ингиби- рующее воздействие на все иссле- дуемые патогены, одновременно с этим улучшая рост растения; <i>Cryptosporiopsis</i> sp. более выражено ингибировал рост патогенов / <i>P. Sphaeoides</i> had an inhibitory effect on all studied pathogens while improving plant growth; <i>Cryptospor-</i> <i>iopsis</i> sp. more pronounced inhibition of the growth of pathogens	[70]
<i>Trichoderma</i> <i>asperellum</i> / <i>Lactuca sativa</i> L.	<i>Curvularia aeria</i> , <i>Corynespora cassiicola</i>	Антагонистическая активность (микопаразитизм) / Antagonist activity (mycoparasitism)	Ингибирование роста фитопатогенов / Growth inhibition of phytopathogens	[71]
<i>Trichoderma viride</i> / <i>Spilanthes pariculata</i> Rich. ex Pers.	<i>Alternaria solani</i> , <i>Fusarium solani</i> , <i>Colletotrichum acutatum</i>			[72]
<i>Penicillium</i> <i>simplicissimum</i> , <i>Leptosphaeria</i> sp. или <i>Gossypium arboreum</i> L.	<i>Verticillium dahlia</i>			[73]
<i>Diaporthe</i> sp., <i>Leptosphaeria</i> spp., <i>Nigrospora oryzae</i> / <i>Olea europaea</i> L.	<i>Colletotrichum acutatum</i>			[74]
<i>Fomitopsis</i> sp., <i>Fusarium solani</i> , <i>Nigrospora sphaerica</i> , <i>Purpureocillium</i> <i>lilacinum</i> / <i>Sophora</i> <i>tonkinensis</i> Gapnep	<i>Colletotrichum</i> <i>gloeosporioides</i>			[75]
<i>Trichoderma</i> <i>citrinoviridae</i> / <i>Panax</i> <i>ginseng</i> C. A. Mey.	<i>Botrytis cinerea</i> , <i>Alternaria panax</i> , <i>Rhizoctonia solani</i> , <i>Pythium</i> spp.			[76]
<i>Paenibacillus polymyxa</i> / <i>Morinda citrifolia</i> L.	<i>Aspergillus aculeatus</i>			[77]
<i>Rhizopycnis vagum</i> / <i>Zingiber officinale</i> Rosc	<i>Fusarium oxysporum</i> , <i>Sclerotium rolfsii</i> , <i>Rhizoctonia solani</i>			[78]
<i>Diaporthe citri</i> , <i>Phomopsis</i> spp. / <i>Sapindus Saponaria</i> L.	<i>Fusarium solani</i> , <i>Glomerella</i> spp., <i>Moniliophthora</i> <i>perniciosa</i>	Продуцирование амилазы, пектиназы и целлюлазы / Production of amylase, pectinase and cellulase	Продуцируемые метаболиты де- монстрировали защиту растения от фитопатогенов / Produced metabo- lites demonstrated plant protection against phytopathogens	[79]

В современной научной литературе содержится значительное количество примеров антагонистических свойств эндофитов. Например, М. Ц. Манганыи и соавт. (M. C. Manganyi et al.) при изучении антимикробных свойств эндофитных грибов выяснили, что штамм *Fusarium oxysporum* (GG 008), выделенный из растения *Sceletium tortuosum* L., оказался антагонистом *Staphylococcus aureus* (ATCC 25923), *Escherichia coli* (ATCC 25922), *Pseudomonas aeruginosa* (ATCC 27853) и *Candida albicans* (ATCC 69548) [80]. Ю. Ли и соавт. (Y. Li et al.) исследовали биологическую активность соединений эндофита *Colletotrichum gloeosporioides* B12 [81]. В результате ученые выделили два новых соединения – коллетолид А и В, которые проявляли умеренную антибактериальную активность против бактерий *Xanthomonas oryzae* pv. *oryzae*, *X. oryzae* pv. *oryzicola* и *Ralstonia solanacearum*.

Важную роль в биологическом контроле играют эндофитные грибы рода *Aspergillus*. Данный род микроскопических грибов является продуцентом множества полезных вторичных метаболитов. К примеру, З. Ву и соавт. (Z. Wu et al.) выделили из гриба *Aspergillus micronesiensis* секохалазины А и В, являющиеся новыми соединениями бициклических 17, 18-секо-аспохалазинов [82]. Данные соединения обладали антимикробной активностью против патогенных микроорганизмов *Staphylococcus aureus*, метицилин резистентного *Staphylococcus aureus*, а также *Candida albicans*.

С. Гупта и соавт. (S. Gupta et al.) выделили несколько эндофитных микроорганизмов из имбиря аптечного (*Zingiber officinale* Roscoe) [83]. Особое внимание ученые уделили эндофиту *Aspergillus terreus*. Данный изолят проявлял высокую антибактериальную и противогрибковую активность. С помощью различных методов биоанализа удалось выделить вторичный метаболит данного гриба – терреин. Его ингибирующая способность была максимальной в отношении микроорганизмов *Enterococcus faecalis* и *Pseudomonas aeruginosa*. Также БАВ проявил ингибирующую способность в отношении фитопатогена *Colletotrichum gloeosporioides*, вызывающего появление пятен на листьях растений и негативно влияющего на качество корневища. Данный метаболит оказался эффективен на 63 %.

Помимо высокой антагонистической активности в отношении фитопатогенов эндофитные микроорганизмы обладают рядом других преимуществ, например, способностью улучшать питание растений, в частности за

счет синтеза фитогормонов, снижать воздействие окислительного стресса путем синтеза метаболитов, обладающих антиоксидантными свойствами.

Доказано, что эндофитные микроорганизмы способны оказывать на растение адаптивный эффект путем улучшения питательного статуса растения, а также повышения уровня его конкурентоспособности в сравнении с другими растениями [84]. Таким эффектом обладают метаболиты грибов рода *Trichoderma*. Исследованием А. Баазеem и соавт. (A. Baazeem et al.), направленным на изучение биологической активности микроорганизма *Trichoderma hamatum* FB10, установлено, что бобовая культура *Vigna radiata* в ассоциации с данным микроорганизмом показала увеличение роста (на 11 %) и содержания сухой массы (на 18 %) по сравнению с контролем [59]. Другим исследованием установлено, что штаммы *Trichoderma*, выделенные из ризосферной почвы северного Алжира, являлись продуцентами фосфатаз, сидерофоров, цианистого водорода и аммиака, а также фитогормонов (гиббереллиновая и индолилуксусная кислоты), тем самым стимулируя рост растений [85].

Известно, что некоторые виды *Epichloe* spp. и *Balansia* spp. продуцируют ауксины (индолилуксусная кислота и родственные индоловые соединения), поддерживая при этом клеточную жизнеспособность и способствуя накоплению питательных веществ тканями растения [86].

Необходимо отметить важную роль ферментного комплекса грибов-антагонистов в механизме защиты растений. Так, представители *Trichoderma* продуцируют внеклеточные литические ферменты, такие как целлюлазы, протеазы, хитиназы и ксиланазы [87]. Виды *Trichoderma* продуцируют разнообразные экзо- и эндохитиназы [88]. Хитиназы – это гидролитические ферменты, которые разрушают гликозидные связи в хитине, основном компоненте клеточных стенок грибов. В случае данного гриба, хитиназы обеспечивают микопаразитический характер взаимодействия *Trichoderma* с фитопатогенами [89]. Исследования Нгуыен Хоанг Лоц и соавт. (Nguyen Hoang Loc et al.) показали, что внеклеточная активность хитиназы в культуральной жидкости после 96 ч культивирования штамма *T. asperellum* PQ34 достигла 22 Ед/мл. Хитиназа в концентрации 60 ед/мл почти полностью ингибировала *in vitro* рост *Colletotrichum* sp. (около 95 %) и *Sclerotium rolfsii* (около 97 %) [90]. Известно также, что штаммы *Trichoderma* со сверхэкспрессией

гена хитиназы подавляли активность фитопатогена *B. cinerea* в экспериментах на растениях [91]. Некоторые протеазы, секретируемые *Trichoderma*, участвуют в инактивации внеклеточных ферментов фитопатогенных грибов [92].

Примечательно исследование российских ученых, которые создали рекомбинантный штамм на основе гриба *Penicillium verruculosum* [93]. Полученный штамм (*Penicillium verruculosum* ХТ403) содержал в себе комплекс внеклеточных ферментов, включая хитиназу. Ферментные препараты, полученные из биомассы *Penicillium verruculosum* ХТ403, проявляли ферментативную активность 0,55, 0,53 и 0,66 ед/мг белка по хитину и хитозанам с молекулярной массой 200 и 1000 кДа соответственно. Ученые пришли к выводу, что данные ферментные препараты могут быть эффективны в борьбе с фитопатогенными грибами за счет разрушения их мицелия.

Продуцировать миколитические ферменты способен ряд бактерий. Г. Э. Актуганов и его коллеги установили, что штамм *Bacillus sp.* 739 продуцирует ряд внеклеточных ферментов, оказывающих разрушительное действие на сапрофитные грибы [94]. В ходе совместного культивирования данного штамма с возбудителем корневой гнили злаков *Bipolaris sorokiniana* процесс деградции гриба возникал за счет активности β -1,3-глюканазы и протеазы. Бактерии рода *Paenibacillus* являются продуцентами гидролитических ферментов, обуславливающих защиту растений от насекомых, болезнетворных бактерий, грибов, нематод и вирусов [95].

Кроме того, эндофиты способны защищать растение от абиотического стресса путем снижения негативных эффектов, вызванных тепловым и солевым стрессом [96, 97, 98, 99], а также формированием устойчивости к токсичным веществам, содержащимся в почвах [100].

Экстремофильные микроорганизмы. Организмы, обладающие способностью выживать в агрессивных средах, называются экстремофилами. Их места обитания характеризуются экстремальными температурами, давлением, крайними значениями pH, засоленностью, высокими концентрациями загрязняющих веществ, радиацией. Данные факторы оказывают влияние на внутренние механизмы микроорганизмов, вызывая ряд биохимических и структурных процессов, приводящих к развитию уникальных качеств [101].

Биологический контроль патогенов растений с использованием экстремофильных

микроорганизмов является перспективной областью исследований в сфере патологии растений [102]. В целом механизмы воздействия экстремофилов на фитопатогены не отличаются от механизмов, используемых другими микроорганизмами, и включают [103]:

- прямой антагонизм;
- индуцированную систематическую резистентность;
- микопаразитизм;
- интерференцию сигналов;
- конкуренцию за питательные вещества.

Среди экстремофильных микроорганизмов, проявляющих антагонистическую активность в отношении фитопатогенов, выделяют виды, принадлежащие к родам *Gliocladium* и *Trichoderma*. Летучие метаболиты, выделяемые данными экстремофилами, нацелены на ряд патогенов, включая *Ustilago hordei*, *F. oxysporum*, *Rhizoctonia solani* и *Phythium ultimum* [101]. В исследовании А. П. Сантос и соавт. (А. Р. Santos et al.) изолят *Exiguobacterium sp.* S56a, выделенный из экстремальных условий почв Анд, проявлял антагонистическую активность в отношении нескольких штаммов фитопатогена *M. Phaseolina* за счет синтеза полиаминов и литических ферментов [104].

Помимо ингибирования фитопатогенов, экстремофильные микроорганизмы способны также стимулировать рост и развитие растений. Обнаружены штаммы, которые повышают устойчивость растений к стрессам, вызванным засухой, температурой (высокой или низкой), pH или засолением. Например, психрофильные микроорганизмы, выделенные из кратера высокогорного вулкана, синтезировали сидерофоры, солибилизировали неорганические фосфаты, ингибировали развитие фитопатогенов, а также увеличивали всхожесть семян томатов (*Solanum lycopersicum* L.) в условиях температурного стресса [105]. Отмечена способность к стимулированию роста растений и у психрофильных видов рода *Pseudomonas*. Дж. Дж. Рондон и соавт. (J. J. Rondon et al.) сообщили, что данные бактерии солибилизировали фосфаты, синтезировали глюконовую кислоту, сидерофоры, индолилуксусную кислоту, а также летучие метаболиты, проявляющие антагонистические свойства в отношении *P. ultimum inhibition assay* [106].

Применение экстремофильных микроорганизмов способно решить ряд проблем, препятствующих эффективной коммерциализации биопестицидов, а именно:

- короткий срок хранения из-за чувствительности биопестицидов к колебаниям температуры и влажности;

- ограниченную полевую эффективность из-за климатических/региональных различий в температуре, влажности, почвенных условиях и т. д.

В то же время для разработки биопестицидов и биопрепаратов на основе экстремофильных микроорганизмов необходимо расширение научной базы и проведение дополнительных исследований. Некоторые штаммы экстремофилов крайне сложно выделяют из природных сред, характеризуются низкой скоростью роста и выходом биомассы. В связи с этим необходим поиск методик, позволяющих накопить необходимую для препарата биомассу с максимальной экономической эффективностью. Особенное внимание следует уделить выбору экстремальных условий для скрининга потенциальных кандидатов в состав препаратов для сельского хозяйства, так как свойства изолятов из различных агрессивных сред значительно различаются. При этом наиболее

перспективен поиск экстремофилов, характеризующихся мультирезистентностью [107].

Заключение. Таким образом, получение биопестицидов является перспективным направлением современного сельского хозяйства. Биопестициды, полученные путем микробного синтеза, более безопасны по сравнению с пестицидами химического происхождения, так как не оказывают негативного воздействия на окружающую среду и здоровье человека.

Продуцентами биопестицидов могут служить эндофитные микроорганизмы, которые населяют ткани растения-хозяина и, тем самым, оказывают больший положительный эффект, чем другие микроорганизмы ризосферы. Перспективными компонентами биопестицидов могут также являться экстремофильные микроорганизмы, которые сохраняют эффективность в неблагоприятных условиях окружающей среды. Однако для успешной коммерциализации препаратов на основе таких микроорганизмов необходимы дополнительные исследования по их выделению и культивированию (в особенности в промышленных масштабах).

Список литературы

1. Drakopoulos D., Kägi A., Six J., Zorn A., Wettstein F. E., Bucheli T. D., Forrer H., Vogelgsang S. The agronomic and economic viability of innovative cropping systems to reduce Fusarium head blight and related mycotoxins in wheat. *Agricultural Systems*. 2021;192:103198. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103198>
2. Mu H., Yang X., Wang K., Tang D., Xu W., Liu X., Ritsema C. J., Geissen V. Ecological risk assessment of pesticides on soil biota: An integrated field-modelling approach. *Chemosphere*. 2023;326:138428. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138428>
3. Asyakina L. K., Vorob'eva E. E., Proskuryakova L. A., Zharko M. Yu. Evaluating extremophilic microorganisms in industrial regions. *Foods and Raw Materials*. 2023;11(1):162-171. DOI: <http://doi.org/10.21603/2308-4057-2023-1-556>
4. Rani L., Thapa K., Kanojia N., Sharma N., Singh S., Grewal A. S., Srivastav A. L., Kaushal J. An extensive review on the consequences of chemical pesticides on human health and environment. *Journal of Cleaner Production*. 2021;283:124657. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124657>
5. Милентева И. С., Фотина Н. В., Жарко М. Ю., Проскурякова Л. А. Перспективы использования микробных препаратов для снижения окислительного стресса сельскохозяйственных растений. *Техника и технология пищевых производств*. 2022;52(4):750-761. DOI: <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-4-2403> EDN: EDMFLC
6. Milentyeva I. S., Fotina N. V., Zharko M. Yu., Proskuryakova L. A. Microbial treatment and oxidative stress in agricultural plants. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv* = Food Processing: Techniques and Technology. 2022;52(4):750-761. (In Russ). DOI: <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-4-2403>
7. Mostafalou S., Abdollahi M. Pesticides: an update of human exposure and toxicity. *Archives of Toxicology*. 2017;91(2):549-599. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00204-016-1849-x>
8. Bolognesi C., Holland N. The use of the lymphocyte cytokinesis-block micronucleus assay for monitoring pesticide-exposed populations. *Mutation Research/ Reviews in Mutation Research*. 2016;770(A):183-203. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mrrev.2016.04.006>
9. Patel O., Syamlal G., Henneberger P. K., Alarcon W. A., Mazurek J. M. Pesticide use, allergic rhinitis, and asthma among US farm operators. *Journal of Agromedicine*. 2018;23(4):327-335. DOI: <https://doi.org/10.1080%2F1059924X.2018.1501451>
10. Dhananjayan V., Ravichandran B. Occupational health risk of farmers exposed to pesticides in agricultural activities. *Current Opinion in Environmental Science & Health*. 2018;4:31-37. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.07.005>
11. Sun S., Sidhu V., Rong Y., Zheng Y. Pesticide Pollution in Agricultural Soils and Sustainable Remediation Methods: a Review. *Current Pollution Reports*. 2018;4:240-250. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40726-018-0092-x>

11. Alengebawy A., Abdelkhalek S. T., Qureshi S. R., Wang M. Heavy Metals and Pesticides Toxicity in Agricultural Soil and Plants: Ecological Risks and Human Health Implications. *Toxics*. 2021;9(3):42. DOI: <https://doi.org/10.3390/toxics9030042>
12. Alexandrino D. A. M., Mucha A. P., Almeida C. M. R., Carvalho M. F. Microbial degradation of two highly persistent fluorinated fungicides – epoxiconazole and fludioxonil. *Journal of Hazardous Materials*. 2020;394:122545. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122545>
13. Sule R. O., Condon L., Gomes A. V. A Common Feature of Pesticides: Oxidative Stress – The Role of Oxidative Stress in Pesticide-Induced Toxicity. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*. 2022;2022:31. DOI: <https://doi.org/10.1155/2022/5563759>
14. Shahid M., Ahmed B., Zaidi A., Khan M. S. Toxicity of fungicides to *Pisum sativum*: a study of oxidative damage, growth suppression, cellular death and morpho-anatomical changes. *RSC Advances*. 2018;8(67):38483-38498. DOI: <https://doi.org/10.1039/c8ra03923b>
15. Satapute P., Kamble M. V., Adhikari S. S., Jogaiah S. Influence of triazole pesticides on tillage soil microbial populations and metabolic changes. *Science of the Total Environment*. 2019;651(2):2334-2344. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.099>
16. Monkiedje A., Ilori M. O., Spiteller M. Soil quality changes resulting from the application of the fungicides mefenoxam and metalaxyl to a sandy loam soil. *Soil Biology and Biochemistry*. 2002;34(12):1939-1948. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(02\)00211-0](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(02)00211-0)
17. Wołojko E., Jabłońska-Trypuć A., Wydro U., Butarewicz A., Łozowicka B. Soil biological activity as an indicator of soil pollution with pesticides – a review. *Applied Soil Ecology*. 2020;147:103356. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.09.006>
18. Cenkseven S., Kocak B., Kuzu S. B., Korkmaz-Guvenmez H., Darici C. Response of microbial activity to addition of *Nerium oleander* L. leaves in soil under different moisture conditions. *Fresenius Environmental Bulletin*. 2017;26(12a):377-385. URL: https://www.researchgate.net/publication/321716956_Response_of_microbial_activity_to_addition_of_Nerium_oleander_L_leaves_in_soil_under_different_moisture_conditions
19. Feng J., Wei K., Chen Z. H., Lü X., Tian J., Wang C., Chen L. Coupling and decoupling of soil carbon and nutrient cycles across an aridity gradient in the drylands of northern china: evidence from coenzymatic stoichiometry. *Global Biogeochemical Cycles*. 2019;33(5):559-569. DOI: <https://doi.org/10.1029/2018GB006112>
20. Acar M., Celik I., Gunal H., Acir N., Barut Z. B., Budak M. Tillage effects on soil organic carbon, microbial biomass carbon and betaglucosidase enzyme activity in a typic haploxerert soil. *Scientific Papers Series A. Agronomy*. 2018;LXI(1):13-20. URL: https://agronomyjournal.usamv.ro/pdf/2018/issue_1/Art1.pdf
21. Fournier B., Santos S. P., Gustavsen J. A., Imfeld G., F. Lamy, Mitchell E. A. D., Mota M., Noll D., Planchamp C., Heger T. J. Impact of a synthetic fungicide (fosetyl-Al and propamocarb-hydrochloride) and a biopesticide (*Clonostachys rosea*) on soil bacterial, fungal, and protist communities. *Science of the Total Environment*. 2020;738:139635. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139635>
22. Lloyd A. W., Percival D., Yurgel S. N. Effect of Fungicide Application on Lowbush Blueberries Soil Microbiome. *Microorganisms*. 2021;9(7):1366. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms9071366>
23. Katsoula A., Vasileiadis S., Sapountzi M., Karpouzas D. G. The response of soil and phyllosphere microbial communities to repeated application of the fungicide iprodione: accelerated biodegradation or toxicity? *FEMS Microbiology Ecology*. 2020;96(6):fiae056. DOI: <https://doi.org/10.1093/femsec/fiae056>
24. Wang X., Li X., Wang Y., Qin Y., Yan B., Martyniuk C. J. A comprehensive review of strobilurin fungicide toxicity in aquatic species: Emphasis on mode of action from the zebrafish model. *Environmental Pollution*. 2021;275:116671. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116671>
25. Завялова Я. С., Богданова В. Д. Влияние пестицидов на организм человека. *Medicus*. 2017;(1):16-18. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27812742> EDN: XKQHCL
- Zavyalova Ya. S., Bogdanova V. D. The influence of pesticides on human organism. *Medicus*. 2017;(1):16-18. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27812742>
26. Бойко Т. В., Герунова Л. К., Герунов В. И., Гонохова М. Н. Токсикологическая характеристика неоникотиноидов. *Вестник Омского государственного аграрного университета*. 2015;(4(20)):49-54. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25108645> EDN: VDLTRD
- Boyko T. V., Gerunova L. K., Gerunov V. I., Gonokhova M. N. Toxicological characteristics of neonicotinoids. *Vestnik Omskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = *Vestnik of Omsk SAU*. 2015;(4(20)):49-54. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25108645>
27. McCarroll N. E., Protzel A., Ioannou Y., Stack H. F., Jackson M. A., Waters M. D., Dearfield K. L. A survey of EPA/OPP and open literature on selected pesticide chemicals. III. Mutagenicity and carcinogenicity of benomyl and carbendazim. *Mutation Research/Reviews in Mutation Research*. 2002;512(1):1-35. DOI: [https://doi.org/10.1016/s1383-5742\(02\)00026-1](https://doi.org/10.1016/s1383-5742(02)00026-1)
28. Sviridov A. V., Shushkova T. V., Ermakova I. T., Ivanova E. V., Epiktetov D. O., Leontievsky A. A. Microbial degradation of glyphosate herbicides (review). *Applied Biochemistry and Microbiology*. 2015;51(2):188-195. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0003683815020209>

29. Дулатов А. Ю., Аманкулова А. А., Макимбетов Е. К. Роль химических агентов в генезе острых лейкозов у детей. Современные проблемы науки и образования. 2020;(2):165.
DOI: <https://doi.org/10.17513/spno.29663>
- Dulatov A. Yu., Amankulova A. A., Makimbetov E. K. The role of chemical agents in the genesis of acute leukemia in children. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* = Modern problems of science and education. 2020;(2):165. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17513/spno.29663> EDN: OWCRLH
30. Турова Н. А., Паскарелов С. И. Влияние пестицидов на организм человека. Modern Science. 2020;(12-3):11-14. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44405003> EDN: QNQRZX
- Turova N. A., Paskarelov S. I. The effect of pesticides on the human body. Modern Science. 2020;(12-3):11-14. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44405003>
31. Rui L. Microbial Biopesticides in Agroecosystems. *Agronomy*. 2018;8(11):235.
DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy8110235>
32. Kumar J., Ramlal A., Mallick D., Mishra V. An Overview of Some Biopesticides and Their Importance in Plant Protection for Commercial Acceptance. *Plants*. 2021;10(6):1185. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants10061185>
33. Kesho A. Microbial bio-pesticides and their use in integrated pest management. *Chemical and Biomolecular Engineering*. 2020;5(1):26-34. DOI: <http://dx.doi.org/10.11648/j.cbe.20200501.15>
34. Salimi F., Hamed J. Biofertilizers: Microbes for Agricultural Productivity. Chapter 14. In Book: *Soil Microbiomes for Sustainable Agriculture*. Baru Sahib.: Springer, 2021. pp. 407-469.
DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-73507-4>
35. Chakraborty N., Mitra R., Pal S., Ganguly R., Acharya K., Minkina T., Sarkar A., Keswani C. Biopesticide Consumption in India: Insights into the Current Trends. *Agriculture*. 2023;13(3):557.
DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture13030557>
36. Yadav R., Singh S., Singh A. N. Biopesticides: Current status and future prospects. *Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences*. 2022;12(3):211-233. URL: [http://www.iaees.org/publications/journals/piaees/articles/2022-12\(3\)/biopesticides-current-status-and-future-prospects.pdf](http://www.iaees.org/publications/journals/piaees/articles/2022-12(3)/biopesticides-current-status-and-future-prospects.pdf)
37. Essiedu J. A., Adepoju F. O., Ivantsova M. N. Benefits and limitations in using biopesticides: A review. *AIP Conference Proceedings*. 2020;2313(1):080002. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0032223>
38. Itkina D. L., Suleimanova A. D., Sharipova M. R. Isolation, Purification, and Identification of the Secretion Compound Pantoea brenneri AS3 with Fungicidal Activity. *Applied Biochemistry and Microbiology*. 2022;58:456-462.
DOI: <https://doi.org/10.1134/S000368382204007X>
39. Salomon M. V., Pinter I. F., Piccoli P., Bottini R. Use of Plant Growth-Promoting Rhizobacteria as Biocontrol Agents: Induced Systemic Resistance Against Biotic Stress in Plants. *Microbial Applications*. 2017;2:133-152.
DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-52669-0_7
40. Догадина М. А., Таракин А. В., Игнатова Г. А., Степанова Е. И., Велкова Н. И., Касаточкина М. Ю., Правдюк А. И., Криворотова Е. И. Аспекты снижения пестицидной нагрузки на экосистемы. Вестник аграрной науки. 2022;(5(98)):107-113. DOI: <https://doi.org/10.17238/ISSN2587-666X.2022.5.107> EDN: UCJUZR
- Dogadina M. A., Tarakin A. V., Ignatova G. A., Stepanova E. I., Velkova N. I., Kasatochkina M. Yu., Pravdyuk A. I., Krivorotova E. I. Aspects of reducing pesticide load on ecosystems. *Vestnik agrarnoy nauki* = Bulletin of agrarian science. 2022;5(98):107-113. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17238/ISSN2587-666X.2022.5.107>
41. Сафроновская Г. Биопестициды – перспективный сегмент рынка средств защиты растений. Наше сельское хозяйство. 2021;1(249):28-35.
- Safronovskaya G. Biopesticides are a promising segment of the plant protection market. *Nashe sel'skoe khozyaystvo*. 2021;1(249):28-35. (In Russ.).
42. Arthurs S., Dara S. K. Microbial biopesticides for invertebrate pests and their markets in the United States. *Journal of Invertebrate Pathology*. 2019;165:13-21. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jip.2018.01.008>
43. Verma D. K., Guzmán K. N. R., Mohapatra B., Talukdan D., Chávez-Conzález M. L., Kumar V., Srivastava S., Singh V., Yulianto R., Malar S. E., Ahmad A., Utama G. L., Aguilar C. N. Recent Trends in Plant- and Microbe-Based Biopesticide for Sustainable Crop Production and Environmental Security. *Recent Developments in Microbial Technologies*. 2021. pp.1-37. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/978-981-15-4439-2_1
44. Khan A. R., Mustafa A., Hyder S., Valipour M., Rizvi Z. F., Gondal A. Sh., Yousuf Z., Iqbal R., Daraz U. *Bacillus* spp. as Bioagents: Uses and Application for Sustainable Agriculture. *Biology*. 2022;11(12):1763.
DOI: <https://doi.org/10.3390/biology11121763>
45. Arnauteli S., Bamford N. C., Stanley-Wall N. R., Kovács Á. T. *Bacillus subtilis* biofilm formation and social interactions. *Nature Reviews Microbiology*. 2021;19(9):600-614. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41579-021-00540-9>
46. Wu L., Wu H., Chen L., Yu X., Borriess R., Gao X. Difficidin and bacilysin from *Bacillus amyloliquefaciens* FZB42 have antibacterial activity against *Xanthomonas oryzae* rice pathogens. *Scientific reports*. 2015;5(1):12975.
DOI: <https://doi.org/10.1038/srep12975>
47. Zhang L., Jin M., Shi X., Jin L., Hou X., Yu Y., Liu B., Cao J., Quan C. Macrolactin metabolite production by *Bacillus* sp. ZJ318 isolated from marine sediment. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 2022;194(6):2581-2593.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s12010-022-03841-8>

48. Romero-Tabarez M., Jansen B., Sylla M., Luensdorf H., Häussler S., Santosa D. A., Timmis K. N., Molinari G. 7-O-Malonyl macrolactin A, a new macrolactin antibiotic from *Bacillus subtilis* – active against methicillin-resistant *Staphylococcus aureus*, vancomycin-resistant enterococci and a small-colony variant of *Burkholderia cepacia*. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*. 2006;50(5):1701-1709. DOI: <https://doi.org/10.1128/aac.50.5.1701-1709.2006>
49. Yu Z., Sun Z., Yin J., Qiu J. Enhanced production of polymyxin E in *Paenibacillus polymyxa* by replacement of glucose by starch. *BioMed research international*. 2018;2018:1934309. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/1934309>
50. Mülner P., Schwarz E., Dietel K., Herfort S., Jähne J., Lasch P., Cernava T., Berg G., Vater J. Fusaricidins, Polymyxins and Volatiles Produced by *Paenibacillus polymyxa* Strains DSM 32871 and M1. *Pathogens*. 2021;10(11):1485. DOI: <https://doi.org/10.3390/pathogens10111485>
51. Fischer S., Príncipe A., Alvarez F., Cordero P., Castro M., Godino A., Jofré E., Mori G. Fighting Plant Diseases Through the Application of *Bacillus* and *Pseudomonas* Strains. *Symbiotic Endophytes*. 2013;37:165-193. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-39317-4_9
52. Raio A., Brilli F., Baraldi R., Neri L., Puopolo G. Impact of spontaneous mutations on physiological traits and biocontrol activity of *Pseudomonas chlororaphis* M71. *Microbiological Research*. 2020;239:126517. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126517>
53. Nandi M., Selin C., Brawerman G., Fernando W. G. D., Kievit T. Hydrogen cyanide, which contributes to *Pseudomonas chlororaphis* strain PA23 biocontrol, is upregulated in the presence of glycine. *Biological Control*. 2017;108:47-54. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2017.02.008>
54. Huang R., Feng Z., Chi X., Sun X., Lu Ya., Zhang B., Lu R., Luo W., Wang Ya., Miao J., Ge Y. Pyrrolnitrin is more essential than phenazines for *Pseudomonas chlororaphis* G05 in its suppression of *Fusarium graminearum*. *Microbiological research*. 2018;215:55-64. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micres.2018.06.008>
55. Anand A., Chinchilla D., Tan C., Mène-Saffrané L., L'Haridon F., Weisskopf L. Contribution of Hydrogen Cyanide to the Antagonistic Activity of *Pseudomonas* Strains Against *Phytophthora infestans*. *Microorganisms*. 2020;8(8):1144. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms8081144>
56. Lyubenova A., Rusanova M., Nikolova M., Slavov S.B. Plant extracts and *Trichoderma* spp: possibilities for implementation in agriculture as biopesticides. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*. 2023;37(1):159-166. DOI: <https://doi.org/10.1080/13102818.2023.2166869>
57. Siebatcheu E. C., Wetadieu D., Youassi O. Y., Boat M. A. B., Bedane K. G., Tchameni N. S., Sameza M. L. Secondary metabolites from an endophytic fungus *Trichoderma erinaceum* with antimicrobial activity towards *Pythium ultimum*. *Natural Product Research*. 2023;37(4):657-662. DOI: <https://doi.org/10.1080/14786419.2022.2075360>
58. Sridharan A. P., Thangappa S., Karthikeya G., Nakkeeran S. Metabolites of *Trichoderma longibrachiatum* EF5 inhibits soil borne pathogen, *Macrophomina phaseolina* by triggering amino sugar metabolism. *Microbial Pathogenesis*. 2021;150:104714. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2020.104714>
59. Baazeem A., Almanea A., Manikanda P., Alorabi M., Vijayaraghavan P., Abdel-Hadi A. In Vitro Antibacterial, Antifungal, Nematocidal and Growth Promoting Activities of *Trichoderma hamatum* FB10 and Its Secondary Metabolites. *Journal of Fungi*. 2021;7(5):331. DOI: <https://doi.org/10.3390/jof7050331>
60. El-Benawy N. M., Abdel-Fattah G. M., Ghoneem K. M., Shabana Y. M. Antimicrobial activities of *Trichoderma atroviride* against common bean seed-borne *Macrophomina phaseolina* and *Rhizoctonia solani*. *Egyptian Journal of Basic and Applied Sciences*. 2020;7(1):267-280. DOI: <https://doi.org/10.1080/2314808X.2020.1809849>
61. Rodríguez C. H., Evans H. C., de Abreu L. M., de Macedo D. M., Ndacnou M. K., Bekele K. B., Barreto R. W. Author Correction: New species and records of *Trichoderma* isolated as mycoparasites and endophytes from cultivated and wild coffee in Africa. *Scientific Reports*. 2021;11(1):19229. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-97704-7>
62. Morales-Cedeño L. R., Orozco-Mosqueda M. C., Loeza-Lara P. D., Parra-Cota F. I., Santos-Villalobos S., Santoyo G. Plant growth-promoting bacterial endophytes as biocontrol agents of pre-and post-harvest diseases: Fundamentals, methods of application and future perspectives. *Microbiological Research*. 2021;242:126612. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126612>
63. Latz M. A., Jensen B., Collinge D. B., Jørgensen H. J. L. Endophytic fungi as biocontrol agents: elucidating mechanisms in disease suppression. *Plant Ecology & Diversity*. 2018;11(5-6):555-567. DOI: <https://doi.org/10.1080/17550874.2018.1534146>
64. Santoyo G., Moreno-Hagelsieb G., Orozco-Mosqueda M. C., Glick B. R. Plant growth-promoting bacterial endophytes. *Microbiological research*. 2016;183:92-99. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micres.2015.11.008>
65. Rodrigo S., García-Latorre C., Santamaria O. Metabolites Produced by Fungi against Fungal Phytopathogens: Review, Implementation and Perspectives. *Plants*. 2022;11(1):81. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants11010081>
66. Fadji A. E., Babalola O. O. Elucidating Mechanisms of Endophytes Used in Plant Protection and Other Bioactivities With Multifunctional Prospects. *Frontiers Bioengineering and Biotechnology*. 2020;8:467. DOI: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00467>
67. Mulero-Aparicio A., Agustí-Brisach C., Varo Á., López-Escudero F. J., Trapero A. A non-pathogenic strain of *Fusarium oxysporum* as a potential biocontrol agent against *Verticillium* wilt of olive. *Biological Control*. 2019;139:104045. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2019.104045>

68. Zheng Y. K., Miao C. P., Chen H. H., Huang F. F., Xia Yu. M., Chen Yo. W., Zhao L. X. Endophytic fungi harbored in *Panax notoginseng*: diversity and potential as biological control agents against host plant pathogens of root-rot disease. *Journal of Ginseng Research*. 2017;41(3):353-360. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jgr.2016.07.005>
69. Yehia R. S., Osman G. H., Assagaf H., Salem R., Mohamed M. S. M. Isolation of potential antimicrobial metabolites from endophytic fungus *Cladosporium cladosporioides* from endemic plant *Zygophyllum mandavillei*. *South African Journal of Botany*. 2020;134:296-302. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2020.02.033>
70. Terhonen E., Sipari N., Asiegbu F. O. Inhibition of phytopathogens by fungal root endophytes of Norway spruce. *Biological Control*. 2016;99:53-63. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2016.04.006>
71. Baiyee B., Ito S., Sunpapao A. J. P. *Trichoderma asperellum* T1 mediated antifungal activity and induced defense response against leaf spot fungi in lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Physiological and Molecular Plant Pathology*. 2019;106:96-101. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2018.12.009>
72. Talapatra K., Das A. R., Saha A., Das P. In vitro antagonistic activity of a root endophytic fungus toward plant pathogenic fungi. *Journal of Applied Biology and Biotechnology*. 2017;5(2):68-71. DOI: <https://doi.org/10.7324/JABB.2017.50210>
73. Yuan Y., Feng H., Wang L., Li Z., Shi Y., Zhao L., Feng Z., Zhu H. Potential of endophytic fungi isolated from cotton roots for biological control against *Verticillium* wilt disease. *PLoS ONE*. 2017;12:e0170557. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0170557>
74. Landum M. C., Félix M. D. R., Alho J., Garcia R., Cabrita M. J., Rei F., Varanda C. M. R. Antagonistic activity of fungi of *Olea europaea* L. against *Colletotrichum acutatum*. *Microbiological Research*. 2016;183:100-108. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micres.2015.12.001>
75. Yao Y. Q., Lan F., Qiao Y. M., Wei J. G., Huang R. S., Li L. B. Endophytic fungi harbored in the root of *Sophora tonkinensis* Gapnep: diversity and biocontrol potential against phytopathogens. *MicrobiologyOpen*. 2017;6(3):e00437. DOI: <https://doi.org/10.1002/mbo3.437>
76. Park Y. H., Mishra R. C., Yoon S., Kim H., Park C., Seo S. T., Bae H. Endophytic *Trichoderma citrinoviride* isolated from mountain-cultivated ginseng (*Panax ginseng*) has great potential as a biocontrol agent against ginseng pathogens. *Journal of Ginseng Research*. 2019;43(3):408-420. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jgr.2018.03.002>
77. Liu Y., Bai F., Li T., Yan H. An endophytic strain of genus *Paenibacillus* isolated from the fruits of Noni (*Morinda citrifolia* L.) has antagonistic activity against a Noni's pathogenic strain of genus *Aspergillus*. *Microbial Pathogenesis*. 2018;125:158-163. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2018.09.018>
78. Anisha C., Jishma P., Bilzamal V. S., Radhakrishnan E. K. Effect of ginger endophyte *Rhizopycnis vagum* on rhizome bud formation and protection from phytopathogens. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 2018;14:116-119. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2018.02.015>
79. Santos C. M., Ribeiro A. S., Garcia A., Polli A. D., Polonio J. C., Azevedo J. L., Pamphile J. A. Enzymatic and antagonist activity of endophytic fungi from *Sapindus saponaria* L. (Sapindaceae). *Acta Biologica Colombiana*. 2019;24:322-330. DOI: <https://doi.org/10.15446/abc.v24n2.74717>
80. Manganyi M. C., Regnier T., Tchatchouang C. K., Bezuidenhout C. C., Ateba C. N. Antibacterial activity of endophytic fungi isolated from *Sceletium tortuosum* L. (Kougoed). *Annals of Microbiology*. 2019;69:659-663. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13213-019-1444-5>
81. Li Y., Wei W., Wang R. L., Liu F., Wang Y. K., Li R., Khan B., Lin J., Yan W., Ye Y. H. Colletolides A and B, two new γ -butyrolactone derivatives from the endophytic fungus *Colletotrichum gloeosporioides*. *Phytochemistry Letters*. 2019;33:90-93. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.phytol.2019.08.004>
82. Wu Z., Zhang X., Anbari W. H. A., Zhou Q., Zhou P., Zhang M., Zeng F., Chen C., Tong Q., Wang J., Zhu H., Zhang Yo. Cysteine residue containing merocytochalasans and 17, 18-seco-aspochalasins from *Aspergillus micronesiensis*. *Journal of Natural Products*. 2019;82(9):2653-2658. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jnatprod.9b00016>
83. Gupta S., Choudhary M., Singh B., Singh R., Dhar M. K., Kaul S. Diversity and biological activity of fungal endophytes of *Zingiber officinale* Rosc. with emphasis on *Aspergillus terreus* as a biocontrol agent of its leaf spot. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 2022;39:102234. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2021.102234>
84. Lin W., Zeng J., Wan K., Lv L., Guo L., Li X., Yu X. Reduction of the fitness cost of antibiotic resistance caused by chromosomal mutations under poor nutrient conditions. *Environment international*. 2018;120:63-71. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.07.035>
85. Abdenaceur R., Farida B., Mourad D., Rima H., Zahia O., Fatma S. Effective biofertilizer *Trichoderma* spp. isolates with enzymatic activity and metabolites enhancing plant growth. *International Microbiology*. 2022;25:817-829. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10123-022-00263-8>
86. Naik B. S. Functional roles of fungal endophytes in host fitness during stress conditions. *Symbiosis*. 2019;79:99-115. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13199-019-00635-1>
87. Tchameni S. N., Cotârlet M., Ghinea I. O. Bedine M. A. B., Sameza M. L., Borda D., Bahrim G., Dinică R. M. Involvement of lytic enzymes and secondary metabolites produced by *Trichoderma* spp. in the biological control of *Pythium myriotylum*. *International Microbiology*. 2020;23:179-188. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10123-019-00089-x>

88. Aoki Y., Haga S., Suzuki S. Direct antagonistic activity of chitinase produced by *Trichoderma* sp. SANA20 as biological control agent for grey mould caused by *Botrytis cinerea*. *Cogent Biology*. 2020;6(1):1747903. DOI: <https://doi.org/10.1080/23312025.2020.1747903>
89. Kolombet L. V. Fungi of the genus *Trichoderma* are producers of biological products for crop production. Biological features that ensure their activity as producers of biological products. *Prikladnaya toksikologiya*. 2010;1:42-48.
90. Loc N. H., Huy N. D., Quang H. T., Lan T. T., Thu Ha T. T. Characterisation and antifungal activity of extracellular chitinase from a biocontrol fungus, *Trichoderma asperellum* PQ34. *Mycology*. 2020;11(1):38-48. DOI: <https://doi.org/10.1080/21501203.2019.1703839>
91. Gentile A., Deng Z., La Malfa S., Distefano G., Domina F., Vitale A., Polizzi G., Lorito M., Tribulato E. Enhanced resistance to *Phoma tracheiphila* and *Botrytis cinerea* in transgenic lemon plants expressing a *Trichoderma harzianum* chitinase gene. *Plant Breeding*. 2007;126(2):146-151. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1439-0523.2007.01297.x>
92. Hasan S., Gupta G., Anand S., Kaur H. Lytic enzymes of *Trichoderma*: their role in plant defense. *International Journal of Applied Research and Studies*. 2014;3(2):1-5. URL: https://www.researchgate.net/publication/260983686_Lytic_Enzymes_of_Trichoderma_Their_Role_in_Plant_Defense
93. Синицына О. А., Рубцова Е. А., Синельников И. Г., Осипов Д. О., Рожкова А. М., Матыс В. Ю., Бубнова Т. В., Немашкалов В. А., Середа А. С., Щербакова Л. А., Синицын А. П. Создание продуцента хитиназы и использование её препарата для разрушения клеточной стенки микроскопических грибов. *Биохимия*. 2020;85(6):840-848. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0320972520060093> EDN: QFHTYP
94. Sinitsyna O. A., Rubtsova E. A., Sinelnikov I. G., Osipov D. O., Rozhkova A. M., Matys V. Y., Bubnova T. V., Nemashkalov V. A., Sereda A. S., Tcshebakova L. A., Sinitsyn A. P. Development of the chitinase producer and use of enzyme preparation for disruption of mycelial fungal cell wall. *Biokhimiya*. 2020;85(6):840-848. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31857/S0320972520060093>
95. Актуганов Г. Е., Галимзианова Н. Ф., Мелентев А. И., Кузмина Л. Ю. Внеклеточные гидролазы штамма *Bacillus* sp. 739 и их участие в лизисе клеточных стенок микромицетов. *Микробиология*. 2007;76(4):471-479.
96. Aktuganov G. E., Galimzianova N. F., Melentyev A. I., Kuzmina L. Yu. Extracellular hydrolases of strain *Bacillus* sp. 739 and their involvement in the lysis of micromycete cell walls. *Mikrobiologiya = Microbiology*. 2007;76(4):471-479. (In Russ.).
97. Ха Т. З., Канарский А. В., Канарская З. А., Щербаков А. В., Щербакова Е. Н. Перспектива применения бактерий рода *Paenibacillus* в промышленной биотехнологии для получения биопрепаратов сельскохозяйственного назначения. *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование*. 2020;3(47):74-84. DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2020.3.74> EDN: EBCZEU
98. Kha T. Z., Kanarskii A. V., Kanarskaia Z. A., Shcherbakov A. V., Shcherbakova E. N. Prospects and application of *Paenibacillus* in industrial biotechnology for obtaining the bio-based products for agriculture. *Vestnik Povolzhsogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie*. 2020;3(47):74-84. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2020.3.74>
99. Hamayun M., Hussain A., Iqbal A., Khan S. A., Lee I. J. Endophytic fungus *Aspergillus japonicus* mediates host plant growth under normal and heat stress conditions. *BioMed Research International*. 2018;2018:7696831. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/7696831>
100. Ismail I., Hamayun M., Hussain A., Iqbal A., Khan S. A., Khan M. A., Lee I. An Endophytic Fungus *Gliocladium cibotii* Regulates Metabolic and Antioxidant System of Glycine max and *Helianthus annuus* under Heat Stress. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2021;30(2):1631-1640. DOI: <https://doi.org/10.15244/pjoes/125770>
101. Jan F. G., Hamayun M., Hussain A., Jan G., Iqbal A., Khan A., Lee I. An endophytic isolate of the fungus *Yarrowia lipolytica* produces metabolites that ameliorate the negative impact of salt stress on the physiology of maize. *BMC microbiology*. 2019;19(1):3. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12866-018-1374-6>
102. Gupta S., Schillaci M., Walker R., Smith P., Watt M., Roessner U. Alleviation of salinity stress in plants by endophytic plant-fungal symbiosis: Current knowledge, perspectives and future directions. *Plant and Soil*. 2021;461(1):219-244. DOI: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11104-020-04618-w>
103. Bilal S., Shahzad R., Khan A. L., Al-Harrasi A., Kim C. K., Lee I. Phytohormones enabled endophytic *Penicillium funiculosum* LHL06 protects Glycine max L. from synergistic toxicity of heavy metals by hormonal and stress-responsive proteins modulation. *Journal of hazardous materials*. 2019;379:120824. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.120824>
104. Odoh C. K., Obi C. J., Francis A., Unah U. V., Egbe K., Akpi U. K., Lerum N., Wanderi K. Extremophilic Fungi and Their Role in Control of Pathogenic Microbes. *Recent Trends in Mycological Research*. 2021. pp.219-249. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-60659-6_10
105. Carreras-Villaseñor N., Sánchez-Arreguín J. A., Herrera-Estrella A. H. *Trichoderma*: sensing the environment for survival and dispersal. *Microbiology*. 2012;158(1):3-16. DOI: <https://doi.org/10.1099/mic.0.052688-0>

103. Kalu A. U., Kenneth O. C. Antimicrobial Activity of *Pleurotus squarrosulus* on Clinical Pathogenic Bacteria and Fungi. *Journal of Advances in Microbiology*. 2017;4(3):1-9. DOI: <https://doi.org/10.9734/JAMB/2017/34644>
104. Santos A. P., Muratore L. N., Solé-Gil A., Farías M. E., Ferrando A., Blázquez M. A., Belfiore C. Extremophilic bacteria restrict the growth of *Macrophomina phaseolina* by combined secretion of polyamines and lytic enzymes. *Biotechnology Reports*. 2021;32:e00674. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.btre.2021.e00674>
105. Tapia-Vázquez I., Sánchez-Cruz R., Arroyo-Domínguez M., Lira-Ruan V., Sánchez-Reyes A., Sánchez-Carbente M. D. R., Padilla-Chacón D., Batista-García R. A., Folch-Mallol J. L. Isolation and characterization of psychrophilic and psychrotolerant plant-growth promoting microorganisms from a high-altitude volcano crater in Mexico. *Microbiological Research*. 2020;232:126394. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micres.2019.126394>
106. Rondón J. J., Ball M. M., Castro L. T., Yarzabal L. A. Eurypsychrophilic *Pseudomonas* spp. isolated from Venezuelan tropical glaciers as promoters of wheat growth and biocontrol agents of plant pathogens at low temperatures. *Environmental Sustainability*. 2019;2:265-275. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42398-019-00072-2>
107. Abbas R., Rasul S., Aslam K., Baber M., Shahid M., Mubeen F., Naqqash T. Halotolerant PGPR: A hope for cultivation of saline soils. *Journal of King Saud University – Science*. 2019;31(4):1195-1201. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2019.02.019>

Сведения об авторах

✉ **Фасхутдинова Елизавета Рафаиловна**, младший научный сотрудник лаборатории фитореимедиаии техногенно нарушенных экосистем, ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», ул. Красная, д. 6, г. Кемерово, Российская Федерация, 650000, e-mail: rector@kemsu.ru,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9711-2145>, e-mail: fastkhutdinovae.98@mail.ru

Голубцова Юлия Владимировна, доктор техн. наук, проректор по развитию имущественного комплекса, ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», ул. Красная, д. 6, г. Кемерово, Российская Федерация, 650000, e-mail: rector@kemsu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2958-4172>

Неверова Ольга Александровна, доктор биол. наук, профессор, заведующий кафедрой экологии и природопользования, ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», ул. Красная, д. 6, г. Кемерово, Российская Федерация, 650000, e-mail: rector@kemsu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0309-5709>

Ларичев Тимофей Альбертович, кандидат хим. наук, ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», ул. Красная, д. 6, г. Кемерово, Российская Федерация, 650000, e-mail: rector@kemsu.ru,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0166-2527>

Хорошкина Наталья Николаевна, младший научный сотрудник лаборатории фитореимедиаии техногенно нарушенных экосистем, ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», ул. Красная, д. 6, г. Кемерово, Российская Федерация, 650000, e-mail: rector@kemsu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4236-5370>

Information about the authors

✉ **Elizaveta R. Faskhutdinova**, junior researcher, the Laboratory of Phytoremediation of Technogenically Disturbed ecosystems, Kemerovo State University, Krasnaya str., 6, Kemerovo, Russian Federation, 650000, e-mail: rector@kemsu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9711-2145>, e-mail: fastkhutdinovae.98@mail.ru

Yulia V. Golubtsova, DSc in Engineering, vice-rector for the development of the property complex, Kemerovo State University, Krasnaya str., 6, Kemerovo, Russian Federation, 650000, e-mail: rector@kemsu.ru,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2958-4172>

Olga A. Neverova, DSc in Biological Science, professor, head of the Department of Ecology and Nature Management, Kemerovo State University, Krasnaya str., 6, Kemerovo, Russian Federation, 650000, e-mail: rector@kemsu.ru,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2958-4172>

Timothy A. Larichev, PhD in Chemistry, Kemerovo State University, Krasnaya str., 6, Kemerovo, Russian Federation, 650000, e-mail: rector@kemsu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0166-2527>

Natalia N. Khoroshkina, junior researcher, the Laboratory of Phytoremediation of Technogenically Disturbed Ecosystems, Kemerovo State University, Krasnaya str., 6, Kemerovo, Russian Federation, 650000,

e-mail: rector@kemsu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4236-5370>

✉ – Для контактов / Corresponding author

<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.5.739-748>

УДК 633.11:631.559:631.524

Изменчивость и взаимосвязь селекционно-ценных признаков сортов и линий яровой мягкой пшеницы в условиях Среднего Поволжья

© 2023. И. Ф. Дёмина ✉

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

В статье представлены результаты трёхлетнего изучения (2020–2022 гг.) 16 сортов и 17 селекционных линий яровой мягкой пшеницы селекции Федерального научного центра лубяных культур в почвенно-климатических условиях Пензенской области. Урожайность в опыте варьировала от 1,77 до 4,15 т/га. Наибольшую урожайность показали семь образцов: Наставник, Эритроспермум 70/04-3, Ирвита, Сенсей, Эритроспермум 20/08-7, Лютеценс 1/12-19, Эритроспермум 15/08-4, превысившие стандартный сорт Архат на 0,27–0,71 т/га. В наших исследованиях урожайность относилась к средневариабельному признаку ($CV = 11,9-19,5\%$). Варьирование продолжительности вегетационного периода изучаемых образцов яровой пшеницы в среднем составило 81–93 суток. Более коротким он был в 2021 году (от 67 до 80 суток), наиболее продолжительным в 2022 году (от 91 до 100 суток). Высота растений яровой мягкой пшеницы в наших исследованиях была низковариабельным признаком ($CV = 3,4-8,5\%$) и составляла в среднем по годам 82,1–100,2 см. Озернённость колоса изменялась от 18 шт. у линии Эритроспермум 25/08-11-18 в 2022 году до 40 шт. у сорта Наставник в 2021 году, признак средневариабельный ($CV = 11,3-18,5\%$). Наибольшая средняя продуктивность колоса получена в 2022 году 1,08 г, наименьшая в 2020 году – 0,92 г. Высокую массу зерна с колоса имели образцы Наставник – 1,40 г, Эритроспермум 70/04-3 – 1,38 г, Ирвита – 1,35 г, которые характеризовались высокой урожайностью. Выделившиеся по урожайности образцы Эритроспермум 70/04-3, Эритроспермум 20/08-7 и Ирвита обладали крупнозёрностью – 40,6–43,2 г. Между урожайностью и массой зерна с растения выявлена значимая корреляционная связь ($r = 0,908...0,924$, $P \leq 0,001$). Изученные закономерности можно будет использовать в экологической селекции яровой мягкой пшеницы.

Ключевые слова: *Triticum aestivum* L., урожайность, линия, корреляционная связь, вариация

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный научный центр лубяных культур» (тема № FGSS – 2022-0008).

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

Конфликт интересов: автор заявил об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Дёмина И. Ф. Изменчивость и взаимосвязь селекционно-ценных признаков сортов и линий яровой мягкой пшеницы в условиях Среднего Поволжья. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2023;24(5):739-748. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.5.739-748>

Поступила: 09.02.2023

Принята к публикации: 05.09.2023

Опубликована онлайн: 30.10.2023

Variability and interrelation of breeding-valuable traits of varieties and lines of spring soft wheat in the conditions of the Middle Volga region

© 2023. Irina F. Demina ✉

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

The article presents the results of a three-year study (2020–2022) of 16 varieties and 17 breeding lines of spring soft wheat bred by the Federal Scientific Center for Bast Fiber Crops in the soil and climatic conditions of the Penza region. The crop productivity in the experiment varied between 1.77–4.15 t/ha. Seven samples demonstrated the highest productivity: Nastavnik, Eritrospermum 70/04-3, Irvita, Sensei, Eritrospermum 20/08-7, Lutestsens 1/12-19, Eritrospermum 15/08-4, which exceeded the standard variety Arkhat by 0.27–0.71 t/ha. During the studies the yield was related to the average variable trait ($CV = 11.9-19.5\%$). The variation of the duration of the growing season of the studied spring wheat samples averaged 81–93 days. It was shorter in 2021 (from 67 to 80 days), the longest in 2022 (from 91 to 100 days). The height of spring soft wheat plants in the studies was a low-variable feature ($CV = 3.4-8.5\%$) and averaged 82.1–100.2 cm over the years. The ear grain content varied from 18 pieces in the Erythrospermum 25/08-11-18 in 2022 up to 40 pieces in the Nastavnik variety in 2021. The trait was medium-variable ($CV = 11.3-18.5\%$). The highest average productivity of an ear was noted in 2022 – 1.08 g, and the lowest in 2020 – 0.92 g. The high mass of grain per ear was noted in Nastavnik variety – 1.40 g, Eritrospermum 70/04-3 – 1.38 g, Irvita – 1.35 g, which were characterized by high yield. Eritrospermum 70/04-3, Eritrospermum 20/08-7 and Irvita selected by the genotype productivity were characterized by bulky grains of 40.6–43.2 g. A significant correlation was observed between the yield and the grain weight per plant ($r = 0.908...0.924$, $P \leq 0.001$). The studied patterns can be used in ecological breeding of soft spring wheat.

Keywords: *Triticum aestivum* L., yield, line, correlation, variation

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 Scientific Center for Bast Fiber Crops (theme No. FGSS – 2022-0008). The author thanks 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 citation: Demina I. F. Variability and interrelation of breeding-valuable traits of varieties and lines of spring soft wheat in the conditions of the Middle Volga region. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2023; 24(5):739-748. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.5.739-748>

Received: 09.02.2023

Accepted for publication: 05.09.2023

Published online: 30.10.2023

Пшеница считается важной продовольственной и кормовой культурой. В мире она занимает лидирующее место (около 39 %) по посевным площадям среди возделываемых культур. Такое широкое распространение объясняется высокой питательностью зерна пшеницы, возможностью его разностороннего использования и переработки [1]. Российская Федерация занимает лидирующую позицию по выращиванию и продаже зерна пшеницы в другие страны, поэтому производство зерна в необходимом объёме является одним из основных факторов стабилизации экономики России.

Для увеличения валовых сборов зерна необходимо создавать сорта с высоким потенциалом продуктивности, имеющих максимально высокую степень её реализации независимо от складывающихся лимитов среды [2, 3]. Основные направления селекции пшеницы в Средневолжском регионе, в который входит Пензенская область, обусловлены агроклиматическими особенностями (засухой в критические периоды развития растений, расовым и видовым составом патогенов) и спросом товаропроизводителей. Сорта яровой пшеницы, адаптированные к условиям региона, могут давать высокие урожаи (до 5,0 т/га) [4, 5].

Длительность вегетационного периода определяет пригодность сорта культуры к возделыванию в конкретной климатической зоне. В годы с обильным увлажнением и прохладной в течение вегетационного периода погодой происходит полегание растений, поражение различными видами ржавчины (бурой и стеблевой) и мучнистой росой [6, 7]. В такие годы недобор положительных температур удлинит вегетационный период растений пшеницы, что пагубно сказывается на сроках созревания, своевременной уборке и качестве урожая. Следовательно, учитывая особенности местного климата, основным направлением селекции является создание засухоустойчивых и в то же время отзывчивых на хорошее увлажнение пластичных, со стабильной урожайностью сортов яровой пшеницы среднераннего, среднеспелого и среднепозднего типов созревания.

Повышение урожайности зерна пшеницы является приоритетной целью при его производстве. Урожайность считается полигенным признаком, который обусловлен генетической природой сорта, изменяется под влиянием условий внешней среды и формируется множественными показателями. Основные из них – число продуктивного стеблестоя на 1 м² и масса зерна с колоса. Первый показатель зависит от норм высева, полевой всхожести, сохранившихся к уборке растений, засухоустойчивости и т. д., второй – от длины колоса, количества зерен в колосе и массы 1000 зёрен [8]. Необходимым этапом селекционной работы с пшеницей является выявление степени изменчивости некоторых хозяйственно ценных признаков и установление корреляционных взаимосвязей между ними. Во-первых, уровень связи влияет на эффективность косвенного отбора, который незаменим на первоначальных этапах селекционного процесса. Во-вторых, направление и уровень корреляций определяет необходимость отбора по комплексу признаков. В-третьих, корреляционный анализ необходим, чтобы обосновать модели сортов пшеницы и выделить признаки, которые вносят максимальный вклад в формирование урожайности или её элементов в конкретных экологических условиях. В связи с продолжающимися изменениями климата, учитывая, что температурный режим и количество выпавших осадков считаются основными факторами, определяющими урожайность пшеницы, данная работа особенно актуальна [9, 10].

Цель исследований – изучить изменчивость и взаимосвязи селекционно ценных признаков сортов и селекционных линий яровой мягкой пшеницы для выделения перспективных образцов в условиях Среднего Поволжья.

Новизна исследований – изучение особенностей изменчивости признаков, связанных с развитием и формированием элементов продуктивности яровой мягкой пшеницы, даёт возможность выделить перспективный селекционный материал для условий Среднего Поволжья.

Материал и методы. Исследования проводили в 2020-2022 гг. на материально-технической базе Пензенского НИИСХ (обособленное подразделение ФГБНУ «Федеральный научный центр лубяных культур») в лаборатории селекционных технологий. Объектом изучения служили 16 сортов и 17 линий яровой мягкой пшеницы конкурсного сортоиспытания (стандарт – сорт Архат). Почва опытного участка чернозём выщелоченный среднесиловый тяжёло-суглинистый. Пахотный горизонт имеет мощность 35-40 см. Реакция почвенного раствора слабокислая – $pH_{\text{сол}} 5,8$. Агрохимические показатели: содержание гумуса – 6,52 % (по Тюрину, ГОСТ 26213-91¹); подвижного фосфора – 157 мг/кг и K_2O – 176 мг/кг почвы (по Кирсанову, ГОСТ Р 54650-2011)².

В полевых опытах использовали агротехнические мероприятия, общепринятые для лесостепной зоны. Посев проводили сеялкой СН-10Ц в оптимальные для яровой пшеницы сроки (первая декада мая). Предшественник – чистый пар. Повторность опытов – 6-кратная, площадь делянки 10 м², норма высева 5,5 млн всхожих семян на 1 га. В качестве стандарта

был взят районированный сорт Архат. Анализ структуры урожая выполняли по методике Государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур³. Статистическую обработку данных проводили методами однофакторного дисперсионного, вариационного и корреляционного анализов по Б. А. Доспехову⁴ с использованием пакета программ Microsoft Excel 2010.

Климат Пензенской области умеренно-континентальный. Континентальность постепенно возрастает с запада на восток. Наиболее тёплым месяцем является июль со средней температурой 19,1...19,8 °С, самым холодным январь с температурой -11,3...-13,3 °С. Продолжительность активного роста сельскохозяйственных культур (с температурой выше 10 °С) – 135...147 дней, сумма активных температур – 2100-2400 °С. Распределение тепла и влаги крайне неравномерное как по годам, так и в течение всего вегетационного периода. Годы исследований характеризовались разнообразными условиями по увлажнению и температурному режиму в период вегетации мягкой яровой пшеницы (табл. 1).

Таблица 1 – Характеристика межфазных периодов вегетации яровой мягкой пшеницы (2020-2022 гг.) /
Table 1 – Characteristics of interphase periods of spring soft wheat vegetation (2020-2022)

Показатель / Index	Год / Year	Посев-всходы / Sowing-shoots	Всходы- колошение / Shoots-earing	Колошение- созревание / Earing- maturation	Всходы- созревание / Shoots- maturation
Температура воздуха, °С / Air temperature, °C	2020	13,8	14,6	19,2	16,9
	2021	19,9	19,3	22,8	21,2
	2022	8,8	12,9	20,4	17,0
	Среднегодовое / Average long-term annual	13,9	17,4	20,8	19,1
Осадки, мм / Precipitation, mm	2020	14,6	87,6	98,1	185,7
	2021	10,2	30,8	113,7	144,5
	2022	2,0	103,2	90,0	193,2
	Среднегодовое / Average long-term annual	9,9	99,3	106,5	205,8
ГТК / НТС	2020	1,05	1,12	1,11	1,11
	2021	0,51	0,36	1,19	0,85
	2022	0,30	1,20	1,06	1,10
	Среднегодовое / Average long-term annual	0,90	1,20	1,10	1,20

¹ГОСТ 26213-91. Почвы. Методы определения органического вещества (по Тюрину) М.: Стандартинформ, 1993. 7 с.

²ГОСТ Р 54650-2011. Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО. М.: Стандартинформ, 2013. 11 с.

³Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. М.: Колос, 1985. Вып.1, 2. 267 с.

⁴Доспехов Б. А. Методика полевого опыта с основами статистической обработки результатов. М.: 1985, 351 с.

В 2020 году первая половина вегетационного периода характеризовалась недостатком тепла и избытком влаги, что привело к задержке развития растений пшеницы. Однако в дальнейшем рост температуры и достаточное количество осадков способствовали нормальному формированию элементов продуктивности. Большое количество осадков и неравномерное их распределение во второй половине вегетации вызвало полегание посевов и растянуло сроки уборки. Вегетационный период в среднем по испытываемым сортам и линиям яровой пшеницы составил 94 суток.

Вегетация растений яровой пшеницы в 2021 году протекала в засушливых условиях, что привело к сокращению сроков созревания. В среднем вегетационный период составил 76 суток, что на 12-20 суток меньше среднепогодных данных. Во второй половине вегетации наблюдали высокий температурный режим, который сопровождался большим количеством осадков. Неравномерное их распределение в виде ливневых дождей со шквалистым ветром привело к частичному полеганию яровой пшеницы, что затруднило её уборку.

Погодные условия 2022 года сложились благоприятными для роста и развития яровой пшеницы. Достаточное увлажнение и умеренная среднесуточная температура воздуха в первой половине вегетации положительно повлияли на продуктивность колоса, зерновую и биологическую урожайность. Вторая половина вегетации пшеницы протекала на фоне высоких температур воздуха и небольшого количества осадков. Выпадение осадков носило неравномерный характер и сопровождалось сильными ветрами, что привело к полеганию растений пшеницы. Вегетационный период в среднем составил 96 суток, что на 1-8 суток больше среднепогодных данных.

Результаты и их обсуждение. При выведении новых сортов следует добиваться сочетания хозяйственно полезных признаков на высоком и оптимальном уровнях, изучая при этом корреляционные взаимодействия между ними.

Урожайность считается сложным количественным признаком, суммарным итогом результатов роста и развития растений в течение вегетационного периода. В опыте она варьировала от 1,77 до 4,15 т/га. Наибольшую урожайность показали семь образцов: Наставник, Эритроспермум 70/04-3, Ирвита, Сенсей, Эритроспермум 20/08-7, Лютесценс 1/12-19,

Эритроспермум 15/08-4. В наших исследованиях урожайность относилась к средневарибельному признаку ($CV = 11,9-19,5\%$). Относительно низкий коэффициент вариации отмечен у линий Эритроспермум 70/04-3, Лютесценс 1/12-19 и Эритроспермум 15/08-4.

В 2020 году установлена существенная зависимость урожайности изучаемых образцов яровой мягкой пшеницы от продуктивного стеблестоя, высоты растений, массы зерна с колоса, количества зёрен в колосе, числа колосков в колосе и длины верхнего междоузлия. Другие элементы структуры имели низкие показатели корреляции с урожайностью. В 2021 году выявлена высокая корреляционная связь урожайности с массой зерна с колоса, средняя – с количеством зёрен в колосе и продуктивным стеблестоем, длиной колоса и числом колосков в колосе. В 2022 году продуктивность колоса также имела высокое влияние на урожайность. Корреляционная связь средней величины отмечена с массой 1000 зёрен, высотой растений, продуктивным стеблестоем, количеством колосков в колосе и зерен в колосе.

Расчёт генотипических коэффициентов корреляций для средних значений пар признаков (2020-2022 гг.) показал, что урожайность образцов яровой пшеницы на генотипическом уровне имела сильную достоверную связь с массой зерна с колоса, среднюю – с озернённостью колоса, продуктивным стеблестоем, высотой растения и длиной колоса (табл. 2).

Считается, что продолжительность вегетационного периода определяет ряд сортовых свойств, которые позволяют избежать воздействия абиотических и биотических стрессоров на растения, а также получить зерно различного качества. В наших исследованиях вегетационный период у изучаемых образцов яровой пшеницы в среднем составил 81-93 суток. Анализ данных опыта показал, что по длительности периода вегетации имеются различия: более коротким он был в 2021 году – от 67 до 80 суток, наиболее продолжительным в 2022 году – от 91 до 100 суток.

Период «всходы-колошение» у изучаемых образцов варьировал от 30 до 56 суток, что связано с генетической разнородностью селекционного материала и реакцией конкретного сорта на условия выращивания. В 2021 году его продолжительность была наименьшей – от 30 до 41 суток (в среднем 37 суток), в 2022 году наибольшей – от 48 до 57 суток (в среднем 54 суток). В среднем за три года продолжительным

периодом «всходы-колошение» выделились сорт Наставник и линия Лютесценс 1/12-19 (50 суток), что позволило увеличить период формирования генеративных органов и способствовало росту урожайности (3,65 и 3,32 т/га соответственно). Коротким периодом (41 сутки)

характеризовались сорт Новосибирская 15 и линия Лютесценс 38/08-9, урожайность которых составила 2,59 и 3,38 т/га соответственно. Увеличение продолжительности периода «всходы-колошение» оказало положительное влияние на урожайность яровой мягкой пшеницы.

Таблица 2 – Парные коэффициенты фенотипической (r) и генотипической (r_g) корреляции урожайности яровой мягкой пшеницы с хозяйственно ценными признаками /

Table 2 – Paired coefficients of phenotypic (r) and genotypic (r_g) correlation of spring soft wheat yields with agronomic traits

Показатель / Indicator	2020 год	2021 год	2022 год	r(g)
	r			
Количество продуктивного стеблестоя, шт/м ² / Number of productive stems, pcs/m ²	0,565±0,164**	0,622±0,135***	0,498±0,162**	0,528±0,161**
Высота растений, см / Plant height, cm	0,419±0,163**	0,074±0,179	0,520±0,161**	0,515±0,149**
Длина верхнего междоузлия, см / The length of the upper internode, cm	0,344±0,168*	0,168±0,175	0,405±0,163*	0,395±0,174*
Длина колоса, см / The length of the ear, cm	0,155±0,177	0,459±0,160**	0,379±0,175*	0,503±0,162**
Количество колосков в колосе, шт. / Number of spikelets per ear, pcs	0,358±0,192*	0,429±0,161**	0,398±0,171*	0,482±0,157**
Количество зёрен в колосе, шт. / Number of grains per ear, pcs	0,366±0,167*	0,672±0,133***	0,573±0,163**	0,560±0,159**
Масса зерна с колоса, г / Grain weight per ear, g	0,475±0,158**	0,711±0,126***	0,774±0,120***	0,752±0,118***
Масса 1000 зёрен, г / 1000 grain weight, g	0,211±0,175	0,144±0,173	0,576±0,160**	0,433±0,162**
Продолжительность периода, сут / Duration of the period, days				
«всходы-колошение» / "shoots-earng"	0,456±0,160***	0,423±0,161**	0,587±0,158**	0,445±0,161**
«колошение-восковая спелость» / "earng-wax ripeness"	0,322±0,170*	0,012±0,180	0,346±0,173*	0,122±0,215
Продолжительность вегетационного периода, сут / Duration of the growing season, days	0,299±0,171	0,130±0,178	0,388±0,174*	0,352±0,193*

*Существенно при $P \leq 0,05$; ** при $P \leq 0,01$; *** при $P \leq 0,001$ /

*Significant at $P \leq 0.05$; ** at $P \leq 0.01$; *** at $P \leq 0.001$

По мнению учёных, высота растений – это сложный признак, подверженный сильной модификационной изменчивости под влиянием условий среды [11]. В наших опытах у яровой мягкой пшеницы высота растений составила в среднем по годам 82,1-100,2 см. Известно, что на высоту растений оказывают влияние количество выпавших осадков или, точнее, сроки их выпадения [12]. Наибольшие показатели высоты растений были отмечены в 2022 году (89-110 см) в условиях нормального увлажнения в фазу «колошение». Наименьшие

показатели выявлены в 2021 году (71,5-95,6 см) при аномально засушливых условиях (табл. 3).

По данным анализа фенотипической изменчивости, высота растений в наших исследованиях была низковариабельным признаком ($CV = 3,4-8,5\%$), имела сильную достоверную корреляцию с массой зерна с колоса и растения ($r = 0,732$, $r = 0,754$ соответственно). Связь средней величины выявлена с длиной колоса ($r = 0,635$), количеством колосков в колосе ($r = 0,474 \dots 0,533$), количеством зёрен с колоса и растения ($r = 0,573 \dots 0,584$, $r = 0,459 \dots 0,572$ соответственно), массой 1000 зёрен ($r = 0,532 \dots 0,576$).

Таблица 3 – Характеристика высокопродуктивных сортов и линий яровой мягкой пшеницы оптимальной высоты (2020-2022 гг.) /
Table 3 – Characteristic highly productive varieties and lines of spring soft wheat, optimal height (2020-2022)

Сорт, линия / Variety, line	Урожайность, t/ha / Yield, t/ha	Отклонение от стандарта, t/ha / Deviation from the standard t/ha	Размах урожайности min-max, t/ha / Yield range, min-max, t/ha	Коэффициент вариации, % / Coefficient of variability, %	Высота растений, см / Plant height, cm	Длина верхнего междоузлия, см / The length of the upper internode, cm
Архат, ст. / Arkhat, st	2,90	-	2,70-3,18	15,2	90,8	43,2
Наставник / Nastavnik	3,61	+0,71	2,45-4,60	20,2	87,1	42,2
Сенсей / Sensei	3,67	+0,77	3,07-4,27	18,9	89,2	41,4
Ирвита / Irvita	3,17	+0,27	2,73-3,36	16,3	98,6	48,5
Эритроспермум 70/04-3 / Erythrospermum 70/04-3	3,34	+0,44	3,04-3,57	11,5	91,7	46,1
Эритроспермум 20/08-7 / Erythrospermum 20/08-7	3,12	+0,22	2,68-3,45	13,5	94,5	41,4
Лютесценс 1/12-19 / Lutescens 1/12-19	3,32	+0,42	2,92-3,54	11,7	85,9	41,5
Эритроспермум 15/08-4 / Erythrospermum 15/08-4	3,29	+0,39	2,95-3,38	11,2	88,0	38,5
Среднее по опыту / Average by experience	3,32	+0,46	-	14,8	90,7	42,8
HCP ₀₅ / LSD ₀₅	0,17	-	-	-	1,6	-

Длина верхнего междоузлия определяет высоту растения. Многие учёные отмечают значительное влияние на величину этого показателя средовых факторов, особенно неблагоприятных условий среды, длина верхнего междоузлия прямо или косвенно оказывает влияние на урожайность и засухоустойчивость растений [13, 14, 15]. В наших исследованиях длина верхнего междоузлия растений яровой мягкой пшеницы в 2020 году составила 43,4 см, в 2021 году (в засушливых условиях) – 32,4 см, в 2022 году (в благоприятных по увлажнению) – 52,4 см.

В засушливый 2021 год у высокопродуктивных (3,07-3,40 т/га) образцов Сенсей, Ирвита, Эритроспермум 70/04-3, Лютесценс 1/12-19 и Эритроспермум 20/08-7 длина верхнего междоузлия достигала 31,4...42,2 см. Данные образцы можно отнести к засухоустойчивым. За период исследований длина верхнего междоузлия характеризовалась средней степенью изменчивости (CV = 10,5-11,2 %). Сильная корреляционная связь отмечена с высотой растений ($r = 0,850...0,901$) и массой зерна с колоса ($r = 0,724...0,735$). Среднюю связь наблюдали с длиной колоса ($r = 0,518...0,542$), количеством зёрен в колосе ($r = 0,463...0,505$), массой зерна с растения ($r = 0,512...0,582$) и массой 1000 зёрен ($r = 0,576...0,584$).

Количество продуктивных стеблей считается одним из основных элементов, слагающих урожайность яровой мягкой пшеницы. По данным наших исследований, за три года продуктивный стеблестой изменялся в пределах от 428 до 548 шт/м². Среднее значение признака в 2020 году – 515 шт/м², в 2021 году – 472, 2022 году – 535 шт/м². Значительное количество продуктивного стеблестоя было сформировано у образцов Наставник, Эритроспермум 70/04-3, Ирвита, Лютесценс 1/12-19 – 528, 519, 515, 506 шт/м² соответственно (табл. 4). Данный показатель относится к сильно варьирующим (CV = 20,5...26,4 %). Средняя корреляционная связь была выявлена с озерненностью и продуктивностью колоса ($r = 0,542$, $r = 0,502$ соответственно).

Таблица 4 – Анализ элементов продуктивности образцов яровой мягкой пшеницы (2020-2022 гг.) /
Table 4 – Analysis of productivity elements of spring soft wheat samples (2020-2022)

Сорт, линия / Variety, line	Количество продуктивного стеблестоя, шт./м ² / Number of productive stems, pcs/m ²		Длина колоса, см / The length of the ear, cm		Количество зёрен в колосе, шт. / Number of grains per ear, pcs		Масса зерна с колоса, г / Grain weight per ear, g		Масса 1000 зёрен, г / 1000 grain weight, g	
	$\bar{x}$	CV*, %	$\bar{x}$	CV*, %	$\bar{x}$	CV*, %	$\bar{x}$	CV*, %	$\bar{x}$	CV*, %
Архат, ст. / Arkhat, st.	507	24,5	8,0	9,3	38,5	17,2	1,30	16,4	38,5	24,5
Наставник / Nastavnik	528	22,3	9,1	9,0	40,8	11,2	1,40	12,4	40,0	22,3
Ирвита / Irvita	515	24,6	7,9	8,6	32,4	11,8	1,35	21,3	42,0	21,5
Эритроспермум 70/04-3 / Erythrospermum 70/04-3	519	23,5	7,4	8,0	32,4	13,5	1,38	20,8	43,2	20,8
Эритроспермум 20/08-7 / Erythrospermum 20/08-7	495	24,2	7,2	8,5	31,9	16,6	1,32	18,9	40,6	24,5
Лютеценс 1/12-19 / Lutescens 1/12-19	506	23,9	8,0	8,7	30,8	15,2	1,33	19,3	39,8	28,1
Эритроспермум 43/08-9 / Erythrospermum 43/08-9	500	25,4	8,0	9,2	31,6	12,5	1,31	20,5	40,8	26,7
Среднее по опыту / Average by the experiment	509,0±22,5	-	7,80±0,15	-	33,9±3,7	-	1,34±0,21	-	40,4±4,2	-
HCP ₀₅ / LSD ₀₅	2,2	-	0,5	-	3,2	-	0,20	-	4,9	-
Min-max	435-524		6,8-9,5		19,3-34,7		0,70-1,40		31,5-46,7	
CV**, %	20,5-26,4		7,8-10,5		11,3-18,5		15,6-20,2		20,8-27,8	

* Паратипический коэффициент вариации / * Paratyptic coefficient of variation; ** Генотипический коэффициент вариации / ** Genotypic coefficient of variation

Косвенными показателями засухоустойчивости генотипов в Поволжье считаются высота растения, длина верхнего междоузлия и продолжительность периода «всходы-колошение», т. к. данные признаки характеризуют состояние метаболизма и ростовые процессы растения, главным образом до фаз «колошение» и «цветение» пшеницы [16].

Длина колоса считается сортовым признаком, который имеет незначительную связь с урожайностью [17]. За годы наших исследований она изменялась от 5,2 см у линии Эритроспермум 25/08-11-18 до 9,5 см у сорта Наставник, обладала низкой вариабельностью (CV = 7,8...10,5 %). Установлена сильная корреляционная связь длины колоса с количеством колосков в колосе ($r = 0,806...0,936$), количеством зёрен с колоса ($r = 0,637...0,889$) и растения ($r = 0,695...0,827$), массой зерна с колоса ($r = 0,669...0,824$) и растения ($r = 0,721...0,808$).

Озернённость колоса изменялась от 18 штук у линии Эритроспермум 25/08-11-18 в 2022 году до 40 штук у сорта Наставник в 2021 году. Признак средневариабельный (CV = 11,3-18,5 %). Относительно меньший коэффициент вариации отмечен у сорта Ирвита (CV = 10,2-13,4 %) и линии Эритроспермум 43/08-9 (CV = 11,8-13,7 %). Сильная корреляция озернённости колоса отмечена с количеством зёрен с растения ($r = 0,859...0,904$), массой зерна с колоса ($r = 0,830...0,857$) и с растения ($r = 0,783...0,803$).

Признак «масса зерна с колоса» можно считать самым значимым элементом структуры урожая, которому в селекционной практике отводится ведущее место. Главный принцип работы многих селекционеров – это отбор нового селекционного материала по колосу [18]. Наибольшее среднее групповое значение массы зерна с колоса получено в 2022 году (1,18 г), наименьшее – в 2020 году (0,92 г). Продуктивность колоса изменялась от 0,72 г в 2020 году у линии Эритроспермум 25/08-11-18 до 1,52 г в 2022 году у Эритроспермум 70/04-3. Высокую массу зерна с колоса имели образцы Наставник (1,40 г), Эритроспермум 70/04-3 (1,38 г), Ирвита (1,35 г), при продуктивности колоса стандарта Архат – 1,30 г. Перечисленные образцы характеризовались высокой урожайностью. Степень изменчивости данного признака находилась в интервале от 15,6 до 20,2 %. (средневариабельный). Относительно низкой вариабельностью выделился сорт Наставник ($CV = 11,6...13,2$ %). Значимая корреляционная связь наблюдалась с массой зерна с растения ($r = 0,908...0,924$).

Масса 1000 зёрен является надёжным показателем при отборе растений на урожайность, который в годы исследований в зависимости от сорта изменялся от 31,5 до 46,7 г. По степени выполненности зерна можно судить об уровне приспособленности различных образцов к жёстким условиям среды в период налива и созревания. Высокие показатели по

признаку «масса 1000 зерен» сформировали за годы изучения образцы Эритроспермум 70/04-3, Ирвита, Эритроспермум 20/08-7, Эритроспермум 43/08-9 и Лютесценс 38/08-9-17 – 43,2, 42,0, 40,6, 40,8 и 40,2 г соответственно (табл. 4). Данный признак показал значительную вариацию ($CV = 20,8-27,8$ %), что свидетельствует о его зависимости от условий произрастания. Корреляционная связь средней величины проявилась с массой зерна с колоса ($r = 0,432...0,543$).

Выводы. Изучение селекционного материала конкурсного сортоиспытания яровой мягкой пшеницы в условиях Среднего Поволжья позволило выделить перспективные сорта и линии, которые превысили стандартный сорт Архат по средней урожайности и элементам ее структуры – Наставник, Эритроспермум 70/04-3, Ирвита, Сенсей, Эритроспермум 20/08-7, Лютесценс 1/12-19, Эритроспермум 15/08-4. Данные образцы характеризовались высокой изменчивостью по признакам: «масса 1000 зёрен», «количество продуктивного стеблестоя»; средней – «количество и масса зёрен с колоса». Анализ корреляционных взаимосвязей показал степень влияния элементов продуктивности на формирование урожайности. Сильная взаимосвязь урожайности установлена с массой зерна с колоса. Изученные закономерности можно будет использовать в экологической селекции яровой мягкой пшеницы.

Список литературы

1. Петрушина О. В. Экспортно-ориентированная стратегия зернового производства. Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2021;(2):90-97.
Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45281648> EDN: EEZTWJ
2. Марченко Д. М. Взаимосвязи между урожайностью и элементами её структуры у сортов мягкой яровой пшеницы. Научный журнал КубГАУ. 2011;(68(04)):1-12. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/vzaimosvyazi-mezhdu-urozhaynostyu-i-elementami-ee-struktury-u-sortov-myagkoy-ozimoy-pshenitsy>
3. Ламажан Р. Р., Липшин А. Г. Изменчивость селекционно-ценных признаков ярового ячменя. Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2019;49(4):17-22.
DOI: <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2019-4-2> EDN: JFTGLW
4. Кривобочек В. Г. Оценка адаптивных свойств новых сортов яровой пшеницы по урожайности в лесостепных условиях Среднего Поволжья. Нива Поволжья. 2015;(2(35)):43-47.
Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23859147> EDN: UCCVYZ
5. Дёмина Е. А., Кинчаров А. И. Корреляционные связи урожайности яровой пшеницы с показателями качества зерна и элементами продуктивности растений. АгроЭкоИнфо. 2017;(4):18.
Режим доступа: http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2017/4/st_421.doc
6. Пискарев В. В., Зуев Е. В., Брыкова А. Н. Исходный материал для селекции яровой мягкой пшеницы в условиях Новосибирской области. Вавиловский журнал генетики и селекции. 2018;22(7):784-794.
DOI: <https://doi.org/10.18699/VJ18.422> EDN: YMZLJB
7. Агеева Е. В., Леонова И. Н., Лихенко Е. И. Полегание пшеницы: генетические и экологические факторы и способы преодоления. Вавиловский журнал генетики и селекции. 2020;24(4):356-362.
DOI: <https://doi.org/10.18699/VJ20.628> EDN: GZCEPB
8. Малокостова Е. И. Характеристика генотипов яровой мягкой пшеницы по комплексу хозяйственно-ценных признаков. Международный научно-исследовательский журнал. 2017;(12-3(66)):123-126.
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.66.106> EDN: YNMOBJ

9. Vitale J., Adam B., Vitale P. Economics of wheat breeding strategies: focusing on Oklahoma hard red winter wheat. *Agronomy*. 2020;10(2):238. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy10020238>
10. Хлесткина Е. К., Журавлёва Е. В., Пшеничникова Т. А., Усенко Н. И., Морозова Е. В., Осипова С. В., Пермякова М. Д., Афонников Д. А., Отмахова Ю. С. Реализация генетического потенциала сортов мягкой пшеницы под влиянием условий внешней среды: современные возможности улучшения качества зерна и хлебопекарной продукции (обзор). *Сельскохозяйственная биология*. 2017;52(3):501-514. DOI: <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2017.3.501rus> EDN: YZKVHR
11. Амунова О. С., Волкова Л. В., Зуев В. Е., Харина А. В. Исходный материал для селекции мягкой яровой пшеницы в условиях Кировской области. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2021;22(5):661-675. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2021.22.5.661-675> EDN: QALWKG
12. Войцукская Н. П. Источники хозяйственно-ценных признаков для селекции озимой мягкой пшеницы в степной зоне Краснодарского края. *Зернобобовые и крупяные культуры*. 2020;(4(36)):106-116. DOI: <https://doi.org/10.24411/2309-348X-2020-11212> EDN: CRJVNY
13. Мухитов Л. А., Самуилов Ф. Д. Величина подколосового междоузлия и продуктивность сортов яровой мягкой пшеницы разных экологических групп в лесостепи Оренбургского Предуралья. *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2014;9(3):135-138. DOI: <https://doi.org/10.12737/6546> EDN: TCDBTP
14. Капко Т. Н., Пискарёв В. В., Бойко Н. И., Тимофеев А. А. Изучение изменчивости и наследования длины верхнего междоузлия мягкой яровой пшеницы в условиях лесостепи Приобья. *Вестник Омского государственного аграрного университета*. 2015;(4(20)):3-9. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25108634> EDN: VDLTMX
15. Лепехов С. Б., Коробейников И. И. Длина верхнего междоузлия и высота растения как способ оценки засухоустойчивости сортов мягкой пшеницы. *Достижения науки и техники АПК*. 2013;(10):22-25. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20448267> EDN: RFMFEB
16. Ковтун В. И., Сухарева А. А. Урожайность и элементы её структуры у новых генотипов пшеницы мягкой озимой в условиях юга России. *Аграрный научный журнал*. 2020;(11):16-19. DOI: <https://doi.org/10.28983/asj.y2020i11pp16-19> EDN: JPQIQZ
17. Иванова И. Ю., Ильина С. В. Вариабельность хозяйственно-ценных признаков яровой мягкой пшеницы. *Международный сельскохозяйственный журнал*. 2020;(2):53-55. DOI: <https://doi.org/10.24411/2587-6740-2020-12030> EDN: GYPYQS
18. Сандухадзе Б. И., Мамедов Р. З., Крахмалёва М. С., Бургова В. В. Урожайность сортов озимой мягкой пшеницы, элементы её структуры и адаптивные свойства в условиях Нечернозёмной зоне. *Зернобобовые и крупяные культуры*. 2021;(3(39)):17-22. DOI: <https://doi.org/10.24412/2309-348X-2021-3-17-22> EDN: XGWVMY

References

1. Petrushina O. V. Export-oriented strategy of grain production. *Vestnik Kurskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii* = Vestnik of Kursk State Agricultural Academy. 2021;(2):90-97. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45281648>
2. Marchenko D. M. Interrelations between productivity and elements of its structure at grades of soft winter wheat. *Nauchnyy zhurnal KubGAU*. 2011;(68(04)):1-12. (In Russ.). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vzaimosvyazi-mezhdu-urozhaynostyu-i-elementami-ee-struktury-u-sortov-myagkoy-ozimoy-pshenitsy>
3. Lamazhap R. R., Lipshin A. G. Variability of characteristics valuable for breeding of spring barley. *Sibirskiy vestnik sel'skokhozyaystvennoy nauki* = Siberian Herald of Agricultural Science. 2019;49(4):17-23. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2019-4-2>
4. Krivobochek V. G. The assessment of adaptive properties of new spring soft wheat according to yield productivity in the conditions of forest-steppe in middle Volga area. *Niva Povolzh'ya* = Volga Region Farmland. 2015;(2(35)):43-47. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23859147>
5. Demina E. A., Kincharov A. I. Correlations of spring wheat yield with grain quality indicators and elements of plant productivity. *AgroEkoInfo* = AgroEcoInfo. 2017;(4):18. (In Russ.). URL: http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2017/4/st_421.doc
6. Piskarev V. V., Zuev E. V., Brykova A. N. Sources for the breeding of soft spring wheat in the conditions of Novosibirsk region. *Vavilovskiy zhurnal genetiki i seleksii* = Vavilov Journal of Genetics and Breeding. 2018;22(7):784-794. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18699/VJ18.422>
7. Ageeva E. V., Leonova I. N., Likhenko E. I. Lodging in wheat: genetic and environmental factors and ways of overcoming. *Vavilovskiy zhurnal genetiki i seleksii* = Vavilov Journal of Genetics and Breeding. 2020;24(4):356-362. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18699/VJ20.628>
8. Malokostova E. I. Description of the genotypes of spring soft wheat by the complex of economically valuable characteristics. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* = International Research Journal. 2017;(12-3(66)):123-126. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.66.106>

9. Vitale J., Adam B., Vitale P. Economics of wheat breeding strategies: focusing on Oklahoma hard red winter wheat. *Agronomy*. 2020;10(2):238. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy10020238>
10. Khlestkina E. K., Zhuravleva E. V., Pshenichnikova T. A., Usenko N. I., Morozova E. V., Osipova S. V., Permyakova M. D., Afonnikov D. A., Otmakhova Yu. S. Modern opportunities for improving quality of bakery products via realizing the bread wheat genetic potential-by-environment interactions (review). *Sel'skokhozyaystvennaya biologiya* = Agricultural Biology. 2017;52(3):501-514. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2017.3.501rus>
11. Amunova O. S., Volkova L. V., Zuev E. V., Kharina A. V. Source for the breeding of soft spring wheat in the conditions of Kirov region. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2021;22(5):661-675. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2021.22.5.661-675>
12. Voitsutskaya N. P. Sources of economically valuable signs for breeding of winter soft wheat in the steppe zone of Krasnodar region. *Zernobobovye i krupyanye kul'tury* = Legumes and Groat Crops. 2020;(4(36)):106-116. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24411/2309-348X-2020-11212>
13. Mukhitov L. A., Samuilov F. D. The size of under-ear interstice and productivity of spring soft wheat varieties of different ecological groups in the forest-steppe of Orenburg region. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Vestnik of the Kazan State Agrarian University. 2014;9(3):135-138. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.12737/6546>
14. Kapko T. N., Piskarev V. V., Boyko N. I., Timofeev A. A. The study of variability and inheritance of length of upper internode of soft spring wheat under conditions of the forest-steppe of Priobje. *Vestnik Omskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Vestnik of Omsk SAU. 2015;(4(20)):3-9. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25108634>
15. Lepekhov S. B., Korobeynikov I. I. Dlina verkhnego mezhdouzliya i vysota rasteniya kak sposob otsenki zasukhoustoychivosti sortov myagkoy pshenitsy. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK* = Achievements of Science and Technology of AICis. 2013;(10):22-25. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20448267>
16. Kovtun V. I., Sukhareva A. A. Productivity and elements of its structure in new genotypes of soft winter wheat of the south of Russia. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal* = The Agrarian Scientific Journal. 2020;(11):16-19. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.28983/asj.y2020i11pp16-19>
17. Ivanova I. Yu., Ilyina S. V. Variability of economically valuable features spring soft wheat. *Mezhdunarodnyy sel'skokhozyaystvennyy zhurnal* = International Agricultural Journal. 2020;(2):53-55. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24411/2587-6740-2020-12030>
18. Sandukhadze B. I., Mamedov R. Z., Krakhmaleva M. S., Bugrova V. V. Yield of winter bread wheat varieties, elements of its structure and adaptive properties in the conditions of the Nechernozem zone. *Zernobobovye i krupyanye kul'tury* = Legumes and Groat Crops. 2021;(3(39)):17-22. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24412/2309-348X-2021-3-17-22>

Сведения об авторе

Дёмина Ирина Фёдоровна, кандидат с.-х. наук, старший научный сотрудник лаборатории селекционных технологий, обособленное подразделение Пензенский НИИСХ ФГБНУ «Федеральный научный центр лубяных культур», ул. Мичурина, 1 «Б», р. п. Лунино, Пензенская обл., Российская Федерация, 442731, e-mail: info.pnz@fncl.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0118-5492>, e-mail: deminaif@mail.ru

Information about the author

Irina F. Demina, PhD in Agricultural Science, senior researcher, the Laboratory of Breeding Technologies, separate subdivision, Penza, Federal Scientific Center for Bast Fiber Crops, Michurin str., 1 «B», Lunino settlement, Penza region, Russian Federation, 442731, e-mail: info.pnz@fncl.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0118-5492>, e-mail: deminaif@mail.ru

✉ – Для контактов / Corresponding author



Адаптивность образцов пленчатого овса в коллекционном питомнике

© 2023. Н. В. Кротова ✉, Г. А. Баталова

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

Актуальной является задача изучения экологической и адаптивной способности образцов пленчатого овса в конкретных условиях выращивания для получения высокой урожайности и устойчивости к биотическим и абиотическим стрессам. В 2020–2022 гг. в условиях Кировской области изучено 47 образцов овса пленчатого (стандарт – сорт Кречет). Неблагоприятные условия для формирования урожайности сложились в 2021 г. ($I_j = -1,2$), относительно благоприятные – в 2020 г. ($I_j = +0,4$) и 2022 г. ($I_j = +0,8$). Урожайность образцов изменялась по годам, коэффициент варьирования менялся от 2,9 % (к-14221 Рс 60, Канада) до 75,4 % (к-15536 UFRGS-11, Бразилия). Отзывчивостью на улучшение условий произрастания ($b_i > 1$) обладали 24 образца, в том числе к-15547, к-14649 (Россия), к-15464 (Казахстан), к-15533, к-15545, к-1554 (Бразилия), к-15583, к-15585 (Швеция) и другие. Амплитуду изменений продуктивности характеризует показатель стабильности (S_i^2). Стабильность урожайности образцов к-15530 UFRGS-2, к-15541 UFRGS-17 (Бразилия), к-13658 Рс 35, к-14221 Рс 60 (Канада) варьировала в пределах 0,04...0,79. Наиболее стрессоустойчивы образцы из Канады (к-14221, к-13670), Бразилии (к-15530, к-15541) и Швеции (к-15586). Генетическая гибкость показывает реакцию растений на условия произрастания, максимальные значения признака (433 ...527 г/м²) отмечены у образцов к-15542 UFRGS-18 (Бразилия), к-14648 Аргамак (Россия), к-14397 Рс 67 (Канада), к-15583 Мутант 230, к-15585 Мутант 261 (Швеция). По результатам испытаний выделено 11 образцов для получения исходного материала с нужными параметрами. Для включения в селекционные программы рекомендуются образцы к-15541 UFRGS-17, к-15542 UFRGS-18, к-13662 Рс 45, к-14668 Рс 54, к-13187 Рс-56, к-14431 Рс 59, к-13658 Рс 35, к-14221 Рс 60, к-14396 Рс 64, к-14397 Рс 67. Данным образцам свойственна адаптивность к меняющимся условиям произрастания по признаку «урожайность».

Ключевые слова: урожайность, пластичность, стабильность, стрессоустойчивость, генетическая гибкость

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого» (тема № FNWE-2022-0009).

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Кротова Н. В., Баталова Г. А. Адаптивность образцов пленчатого овса в коллекционном питомнике. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2023;24(5):749-756. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.5.749-756>

Поступила: 21.04.2023 Принята к публикации: 03.10.2023 Опубликовано онлайн: 30.10.2023

Adaptability of accessions of filmy oats in the collection nursery

© 2023. Nadezda V. Krotova ✉, Galina A. Batalova

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

It is urgent to study the ecological and adaptive ability of oat samples in specific growing conditions to obtain high yields and resistance to biotic and abiotic stresses. In 2020–2022 in the conditions of Kirov region 47 samples of oats (standard - variety Kretchet) were studied. Unfavorable conditions for the formation of yield were in 2021 ($I_j = -1.2$), relatively favorable – in 2020 ($I_j = +0.4$) and 2022 ($I_j = +0.8$). Yield of samples varied among the years, with the coefficient of variation varying from 2.9 % (к-14221 Рс 60, Canada) to 75.4 % (к-15536 UFRGS-11, Brazil). Twenty-four accessions, including к-15547, к-14649 (Russia), к-15464 (Kazakhstan), к-15533, к-15545, к-1554 (Brazil), к-15583, к-15585 (Sweden), etc., were responsive to improvement of growing conditions ($b_i > 1$). The amplitude of productivity changes is characterized by the stability index (S_i^2). Stability of yield of samples к-15530 UFRGS-2, к-15541 UFRGS-17 (Brazil), к-13658 Рс 35, к-14221 Рс 60 (Canada) varied within 0.04...0.79. Samples from Canada (к-14221, к-13670), Brazil (к-15530, к-15541) and Sweden (к-15586) were the most stress tolerant. Genetic flexibility shows the reaction of plants to growing conditions, the maximum values of the trait (433 ...527 g/m²) were observed in samples к-15542 UFRGS-18 (Brazil), к-14648 Argamak (Russia), к-14397 Рс 67 (Canada), к-15583 Mutant 230, к-15585 Mutant 261 (Sweden). According to the results of the tests, 11 samples were selected for obtaining source material with the required parameters. The samples к-15541 UFRGS-17, к-15542 UFRGS-18, к-13662 Рс 45, к-14668 Рс 54, к-13187 Рс-56, к-14431 Рс 59, к-13658 Рс 35, к-14221 Рс 60, к-14396 Рс 64, к-14397 Рс 67 are recommended for inclusion in breeding programs. These samples are characterized by adaptability to varying growing conditions according to the "yield" trait.

Keywords: productivity, plasticity, stability, stress resistance, genetic flexibility

Acknowledgments: the research was carried out under the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky (theme No. FNWE-2022-0009).

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: Krotova N. V., Batalova G. A. Adaptability of accessions of filmy oats in the collection nursery. Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka = Agricultural Science Euro-North-East. 2023;24(5):749-756. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.5.749-756>

Received: 21.04.2023

Accepted for publication: 03.10.2023

Published online: 30.09.2023

Овес занимает пятое место по посевным площадям среди зерновых культур в мировом земледелии. Основная доля посевов приходится на Россию. Способность реализовать потенциал в изменяющихся условиях произрастания определяет ценность сорта [1]. Важную роль в селекции овса отводят созданию сортов, адаптивных к экологическим факторам [2]. Изучение коллекционных образцов овса различного эколого-географического происхождения в конкретных почвенно-климатических условиях позволяет оценить их по комплексу признаков и включить в селекционный процесс для создания нового адаптированного материала, способного реализовать продуктивный потенциал [3, 4].

В связи с этим актуальна задача изучения экологической и адаптивной способности образцов овса в конкретных условиях выращивания [5, 6] для получения высокой урожайности и устойчивости к биотическим и абиотическим стрессам [7, 8].

Цель исследования – изучить в условиях Кировской области коллекционные образцы пленчатого овса по адаптивным свойствам урожайности и выделить лучшие для дальнейшего использования в селекционном процессе.

Научная новизна – представлена характеристика коллекционных образцов овса в условиях Кировской области, которые проанализированы по способности формировать высокую урожайность в различных гидротермических условиях вегетации.

Материал и методы. В 2020-2022 гг. на опытном поле ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого» (ФАНЦ Северо-Востока; Кировская область) изучено 47 образцов овса пленчатого (стандарт – сорт Кречет) в соответствии с методическими рекомендациями ВИР¹. Гидротермический коэффициент (ГТК) рассчитывали по А. И. Селянинову², индекс условий среды (I_j), коэффициент регрессии (b_i), индекс стабильности (S_i^2) – по методике S. A. Eberhart, W. A. Russell в изложении В. З. Пакудина и Л. М. Лопатиной [9]. Показатели стрессоустойчивости ($Y_{\min} - Y_{\max}$) и генетической гибкости ($(Y_{\max} + Y_{\min})/2$) определяли по уравнениям А. А. Rosielle и J. Hamblin в изложении

А. А. Гончаренко [10]. Коэффициент отзывчивости на благоприятные условия выращивания (K_p) находили по методу В. А. Зыкина [11], гомеостатичность (H_{om}) по В. В. Хангильдину [12]. Индекс стабильности (ИС) и индекс интенсивности (ИИ) считали по Р. А. Удачину, А. П. Головченко [13], по Э. Д. Неттевичу определяли показатель уровня стабильности сорта (ПУСС) [14]. Коэффициент вариации (CV) и математическую обработку результатов двухфакторного опыта (сорт, год, их взаимодействие) рассчитывали по методике Б. А. Доспехова³ с помощью программ AGROS 2.07, Microsoft Office Excel 2007. Почва опытного участка дерново-подзолистая среднесуглинистая, размер делянки 1 м², повторность 3-кратная, предшественник – чистый пар.

Результаты и их обсуждение. Условия вегетации в годы исследований были контрастными по температуре и осадкам. Май-июнь 2020 г. характеризовались неустойчивой по температуре погодой с небольшими дождями. В начале июля преобладала очень теплая и жаркая преимущественно сухая погода, во второй половине месяца – умеренно-теплая и теплая с сильными ливнями. Период созревания и уборки был достаточно благоприятен для формирования урожайности овса, гидротермический коэффициент (ГТК) в период «выметывание-созревание» составил 1,95.

Посев и появление всходов в 2021 г. проходили при теплой и жаркой погоде как с сухими, так и дождливыми периодами (ГТК = 0,11). Июнь-июль были умеренно-теплыми и жаркими месяцами (ГТК = 0,67). В августе также преобладала теплая и жаркая сухая погода, что ускорило процессы созревания и начало уборки.

Май-июнь 2022 г. характеризовались неустойчивой, холоднее обычного погодой, преимущественно с небольшими, в отдельные дни значительными осадками. Гидротермический коэффициент в период «всходы-выметывание» составил 2,71. В июле преобладала теплая, временами жаркая сухая погода. В августе наблюдали теплую и жаркую с редкими дождями погоду. Температурный режим и условия увлажнения в августе способствовали созреванию посевов и были благоприятны для уборки (ГТК периода «выметывание-созревание» – 2,05).

¹Международный классификатор рода *Avena* L. Л.: ВИР, 1984. 42 с.; Методические указания по изучению и сохранению мировой коллекции ячменя и овса. СПб: ВИР, 2012. 63 с.

²Селянинов Г. Т. О сельскохозяйственной оценке климата. Труды по сельскохозяйственной метеорологии. 1928;20:165-177.

³Доспехов Б. А. Методика полевого опыта. М.: Альянс, 2014. 351 с.

В целом, период вегетации сложился благоприятным для роста, развития и формирования высокой продуктивности растений овса.

За годы исследований отмечена средняя положительная зависимость между урожайностью и значениями ГТК ($r = 0,51$).

Таблица 1 – Результаты дисперсионного анализа по влиянию изучаемых факторов и их взаимодействия на изменчивость урожайности образцов овса (2020-2022 гг.) /

Table 1 – Results of analysis of variance on the influence of the studied factors and their interaction on the variability of yield of oat samples (2020-2022)

<i>Источник варьирования / Source of variation</i>	<i>ss</i>	<i>df</i>	<i>ms</i>	<i>F</i>	<i>HCP</i>	<i>Доля влияния фактора, % / The share of influence of the factor, %</i>
Общее / General	5362801,500	287	-	-	-	100,0
Блоки / Blocks	2107,093	1	2107,093	5,814*	-	0,04
Варианты / Variants	5308872,500	143	37124,984	102,445*	37,616	98,99
Фактор А (сорт) / Factor A (variety)	2060993,375	2	1030496,688	2843,605*	5,429	38,43
Фактор В (год) / Factor B (year)	1468169,375	47	31237,646	86,199*	21,718	27,38
Взаимодействие АВ / Interaction AB	1779709,750	94	18933,082	52,245*	37,616	33,19
Случайные отклонения / Random deviations	51821,906	143	362,391	-	-	0,97

* Значимо при $P \geq 0,95$ / *It is significant when $P \geq 0.95$

В результате исследований выявлено, что наибольшее влияние на изменчивость урожайности сортообразцов овса оказал фактор «генотип» – 38,43 %. Доля вклада фактора «год» составила 27,38 %, взаимодействия факторов – 33,19 %. То есть при использовании более адаптивных образцов овса существует возможность повышения урожайности и сохранения ее стабильности.

В среднем за 2020-2022 гг. максимальная урожайность получена у пленчатого образца к-15542 UFRGS-18 (Бразилия) – 557 г, или +104 г к стандарту Кречет (табл. 2). Выше или на уровне стандарта (465...498 г/м²) сформировалась урожайность у образцов: к-14648 (Россия), к-15583, к-15584, к-15585 (Швеция), к-14397 (Канада), данные образцы отнесены к средне-спелым (продолжительность периода «всходы-восковая спелость» – 71...74 дня).

Стабильность урожайности определяется в значительной мере условиями окружающей среды, компоненты которой нерегулируемы (температура, осадки, продолжительность светового дня и т. д.). Поэтому изменчивость условий среды, невозможность их контролировать и регулировать обуславливают высокую вариабельность урожайности.

По результатам двухфакторного дисперсионного анализа, сорт (фактор А), погодные условия года (фактор В), а также взаимодействие этих факторов оказали достоверное влияние на урожайность овса на 5%-ном уровне значимости (табл. 1).

Коэффициент вариации служит показателем относительной степени изменчивости признака. Урожайность образцов варьировала по годам, коэффициент варьирования изменялся от незначительного ($CV = 2,9\%$) у образца к-14221 Рс 60 (Канада) до очень высокого ($CV = 75,4\%$) у образца к-15536 UFRGS-11 (Бразилия) (табл. 2).

Средняя изменчивость показателя «урожайность» отмечена у образцов: к-15530 (Бразилия), к-13662, к-14431, к-13658, к-14396 (Канада) ($CV = 14,2...19,8\%$).

Судя по индексу условий среды (I_j), который изменялся от -1,2 до +0,8, лучшие условия для формирования большего показателя урожайности сложились в 2020 г. ($I_j = +0,4$) и 2022 г. ($I_j = +0,8$).

Адаптивность образцов овса определяли по оценке их пластичности, рассчитанной согласно коэффициенту линейной регрессии (b_i). Данная величина позволяет оценить реакцию растений на изменение условий выращивания. Проведенный анализ показал, что отзывчивостью на улучшение условий произрастания ($b_i > 1$) обладают 24 изученных образца, часть из них представлена в таблице 3: к-15547, к-14648 (Россия), к-15464 (Казахстан), к-15533, к-15545, к-15546 (Бразилия), к-15583, к-15585 (Швеция) и другие.

Таблица 2 – Урожайность образцов пленчатого овса в зависимости от условий среды, г/м² /
 Table 2 – Yield of filmy oat samples depending on environmental conditions, g/m²

№ по каталогу / Catalogue No	Название / Name	2020 г.	2021 г.	2022 г.	Среднее / Average	CV, %
к-14857	Кречет, ст. / Krechet, st.	501	325	534	453	24,8
к-15542	UFRGS-18	420	634	618	557	21,4
к-14648	Аргамак / Argamak	460	257	678	465	45,3
к-15583	Мутант 230 / Mutant 230	636	229	629	498	46,8
к-15584	Мутант 258 / Mutant 258	512	315	572	466	28,8
к-15585	Мутант 261 / Mutant 261	533	262	614	470	39,2
к-14397	Рс 67	599	358	448	468	26,0
к-14221	Рс 60	422	401	402	408	2,9
к-15536	UFRGS-11	162	135	491	263	75,4
к-15530	UFRGS-2	255	251	341	282	18,0
к-13662	Рс 45	445	326	443	405	16,8
к-14431	Рс 59	407	462	309	393	19,8
к-13658	Рс 35	367	343	448	386	14,2
к-14396	Рс 64	440	376	532	449	17,4
Индекс условий среды (I _j) / Environment index (I _j)		+0,4	-1,2	+0,8	-	-

Генотипы таких растений относятся к интенсивному типу, хорошо отзываются на благоприятные агрометеорологические условия произрастания, но при этом значительно снижают урожайность при неблагоприятных. К слабоотзывчивым на улучшение условий произрастания ($b_i < 1$) отнесен 21 образец, в том числе к-15549 (Россия), к-15530, к-15539, к-15541 (Бразилия), к-15586 (Швеция), к-13187, к-13658, к-14396 (Канада) и другие. Генотипы к-15550 Среднеспелый 2 (Россия), к-15589 Rousse 244 (Болгария), к-15543 UFRGS-19 (Бразилия) и стандарт Кречет (Россия), у которых коэффициент регрессии близок к 1, имели полное соответствие величины урожайности изменениям условий выращивания.

Амплитуду изменений продуктивности характеризует показатель стабильности (S_i^2), чем меньше его отклонение от нуля, тем стабильнее сорт. Стабильность урожайности образцов к-15530 UFRGS-2, к-15541 UFRGS-17 (Бразилия), к-13658 Рс 35, к-14221 Рс 60 (Канада) варьировала в пределах 0,04...0,79.

Степень устойчивости сортов овса к неблагоприятным факторам среды определяет интервал между минимальной и максимальной урожайностью. Наиболее стрессоустойчивы образцы, имеющие наименьшую разницу: к-14221 (Канада), к-15530, к-15541 (Бразилия), к-13670 (Канада), к-15586 (Швеция).

Генетическая гибкость показывает реакцию растений на условия произрастания, больший показатель определяет степень соответствия между факторами среды и урожайностью. Высокие показатели наблюдали у 14 образцов. Максимальные значения признака (433...527 г/м²) отмечены у к-15542 UFRGS-18 (Бразилия), к-14648 Аргамак (Россия), к-14397 Рс 67 (Канада), к-15583 Мутант 230, к-15585 Мутант 261 (Швеция). Образец к-14221 Рс 60 (Канада) высокую генетическую гибкость сочетал со стрессоустойчивостью. Корреляционной зависимости стрессоустойчивости от генетической гибкости не выявлено ($r = -0,06$).

Для оценки селекционной и хозяйственно полезной ценности образцов используют коэффициент отзывчивости (K_p) на благоприятные условия выращивания. Согласно данным В. А. Зыкина с соавторами [11], чем сильнее отличается урожайность сорта, полученная при благоприятных условиях, от величины урожайности при неблагоприятных, тем более информативны данные. В соответствии с ним все генотипы положительно реагировали на лучшие условия произрастания ($K_p > 1$). Максимальную отзывчивость ($K_p = 3,15...6,04$) наблюдали у сортообразцов из России (к-15547) и Бразилии (к-15533, к-15535, к-15536, к-15544, к-15545, к-15546) (табл. 4).

Таблица 3 – Урожайность, пластичность, стабильность, стрессоустойчивость и генетическая гибкость образцов пленчатого овса (2020-2022 гг.) /

Table 3 – Productivity, plasticity, stability, stress resistance and genetic flexibility of filmy oat samples (2020-2022)

№ по каталогу / Catalogue No	Название / Name	Урожайность, г/м ² / Yield capacity, g/m ²			b_i	S_i^2	$Y_{min} - Y_{max}$	$(Y_{min} + Y_{max})/2$
		min	max	среднее / average				
к-14857	ст. Кречет / st. Krechet	325	534	453	1,06	4,61	-209	430
к-15547	Скороспелый 1 / Skorospely 1	128	505	322	1,39	12,17	-377	317
к-15464	Кулагер / Kulager	202	640	379	1,75	13,91	-438	421
к-15533	UFRGS-8	142	572	371	2,00	15,75	-430	357
к-15545	UFRGS-21	124	519	332	1,50	13,62	-395	322
к-15546	UFRGS-22	188	621	429	1,79	17,44	-433	405
к-14648	Аргамак / Argamak	257	678	465	1,88	13,99	-421	468
к-15583	Мутант 230 / Mutant 230	229	636	498	2,15	20,21	-407	433
к-15585	Мутант 261 / Mutant 261	262	614	470	1,74	12,20	-352	438
к-15549	Среднеспелый 1 / Srednespely 1	235	465	349	0,80	4,40	-230	350
к-15530	UFRGS-2	251	341	282	0,33	0,60	-90	296
к-15539	UFRGS-15	155	306	244	0,68	2,30	-151	231
к-15541	UFRGS-17	309	421	355	0,27	0,70	-112	365
к-15586	Мутант 666 / Mutant 666	294	459	352	0,62	2,03	-165	377
к-13187	Рс 56	302	462	398	0,74	2,64	-160	382
к-13658	Рс 35	343	448	386	0,42	0,79	-105	396
к-14396	Рс 64	376	532	449	0,68	1,84	-156	454
к-15550	Среднеспелый 2 / Srednespely 2	163	382	297	1,03	5,08	-219	273
к-15589	Rousse 244	150	411	295	1,08	6,33	-261	281
к-15543	UFRGS-19	316	513	443	1,00	4,50	-197	415
к-14221	Рс 60	401	422	408	0,04	0,04	-21	412
к-13670	Рс 62	258	387	336	-0,51	1,20	-129	323
к-15542	UFRGS-18	420	634	557	-0,42	3,61	-214	527
к-14397	Рс 67	358	599	468	0,74	4,60	-241	479

Примечания: b_i – коэффициент регрессии, S_i^2 – показатель стабильности, $Y_{min} - Y_{max}$ – стрессоустойчивость, $(Y_{min} + Y_{max})/2$ – генетическая гибкость /

Notes: b_i – regression coefficient, S_i^2 – stability indicator, $Y_{min} - Y_{max}$ – stress resistance, $(Y_{min} + Y_{max})/2$ – genetic flexibility

Реакция растений овса на благоприятный агрофон может быть оценена показателем интенсивности (индекс интенсивности, ИИ). Наиболее высокие показатели индекса интенсивности в исследовании получены у образцов к-15547 Скороспелый 1 (Россия), к-15464 Кулагер (Казахстан), к-15533 UFRGS-8, к-15544 UFRGS-20, к-15546 UFRGS-22 (Бразилия), к-15583 Мутант 230 (Швеция).

Гомеостатичность (H_{om}) характеризуется способностью сводить к минимуму последствия неблагоприятных условий внешней среды. Данный признак варьировал от 1,14 (к-15544 UFRGS-20) до 42,00 (к-14221 Рс 60). Выделены образцы к-15530, к-15541 из Брази-

лии и к-13662, к-13658, к-14396 из Канады (H_{om} 15,47...24,83).

Индекс стабильности (ИС) является признаком гомеостатической реакции образца в различных условиях произрастания. Показатель уровня стабильности сорта (ПУСС) наглядно дает оценку по адаптивной способности, более полно характеризует стабильность и уровень урожайности образцов овса. Наибольшую приспособленность (стабильность признака) к данным условиям по этим двум признакам показали генотипы: к-15542 (Бразилия), к-13662, к-13658, к-14221, к-14396 (Канада) (ИС = 24,04...139,16; ПУСС = 117,31...685,02 % к стандарту).

Таблица 4 – Параметры адаптивности образцов пленчатого овса (2020-2022 гг.) /
Table 4 – Adaptability parameters of filmy oat samples (2020-2022)

№ по каталогу / Catalogue No	Название / Name	K_p	ИИ	H_{om}	ИС	ПУСС
к-14857	ст. Кречет / st. Krechet	1,64	55,73	8,14	18,29	100,00
к-15547	Скороспелый 1 / Skorospely 1	3,95	100,53	1,46	5,50	21,39
к-15533	UFRGS-8	4,03	114,59	1,47	6,37	28,53
к-15535	UFRGS-10	3,15	82,07	1,25	4,15	13,10
к-15536	UFRGS-11	3,64	94,87	0,88	3,48	11,02
к-15544	UFRGS-20	6,04	114,13	1,14	5,37	23,01
к-15545	UFRGS-21	4,19	105,33	1,40	5,55	22,21
к-15546	UFRGS-22	3,30	115,47	1,89	8,35	43,19
к-15464	Кулагер / Kulager	3,17	116,87	1,35	6,24	28,55
к-15583	Мутант 230 / Mutant 230	2,78	108,53	2,28	10,64	63,94
к-14221	Рс 60	1,05	5,60	42,00	139,16	685,02
к-15530	UFRGS-2	1,36	23,95	15,47	15,70	53,45
к-15541	UFRGS-17	1,26	23,28	18,10	21,34	91,32
к-15542	UFRGS-18	1,51	57,07	10,92	26,05	175,14
к-13662	Рс 45	1,37	31,73	17,65	24,04	117,31
к-13658	Рс 35	1,30	27,87	24,83	27,19	126,52
к-14396	Рс 64	1,41	41,52	16,48	25,79	139,71

Примечания: K_p – коэффициент отзывчивости; ИИ – индекс интенсивности; H_{om} – гомеостатичность; ИС – индекс стабильности; ПУСС – показатель уровня стабильности сорта /

Notes: K_p – responsiveness coefficient; ИИ – intensity index; H_{om} – homeostaticity; ИС – stability index; ПУСС – indicator of the level of stability of the variety

Установлена положительная корреляционная зависимость коэффициента вариации с коэффициентом линейной регрессии ($r = 0,73$), коэффициентом отзывчивости ($r = 0,89$) и показателем стабильности ($r = 0,76$), отрицательная – с генетической гибкостью ($r = -0,35$), стрессоустойчивостью ($r = -0,87$) и гомеостатичностью ($r = -0,78$).

Многие авторы отмечают необходимость использования различных методов оценки стабильности и пластичности. Наиболее полная

картина вырисовывается при использовании принципа ранжирования по параметрам и оценке их по сумме рангов для каждого образца. При этом 1-й ранг самый высокий. В исследовании меньшая сумма рангов (152...189) при использовании методов оценки получена у образцов из Бразилии (к-15541 UFRGS-17, к-15542 UFRGS-18), Канады (к-13662 Рс 45, к-14668 Рс 54, к-13187 Рс-56, к-14431 Рс 59, к-13658 Рс 35, к-14221 Рс 60, к-14396 Рс 64, к-14397 Рс 67) (табл. 5).

Таблица 5 – Ранги параметров адаптивной способности образцов пленчатого овса по урожайности (2020-2022 гг.) /

Table 5 – Ranks of parameters of adaptive capacity of filmy oat samples by yield (2020-2022)

Название / Name	CV	b_i	S_i^2	$Y_{min} - Y_{max}$	$(Y_{min} + Y_{max})/2$	H_{om}	K_p	ИС	ИИ	ПУСС	Сумма рангов / Sum of ranks
Ст. Кречет/ St. Krechet	14	24	22	13	13	14	31	10	28	7	176
UFRGS-17	3	39	3	4	22	3	44	6	46	11	181
UFRGS-18	10	42	15	19	1	10	38	3	26	2	166
Рс 45	4	35	7	5	17	4	41	5	43	5	166
Рс 54	12	30	14	16	11	12	34	8	31	8	176
Рс-56	9	33	13	10	19	9	37	9	37	13	189
Рс 59	7	44	8	8	17	7	39	7	39	10	186
Рс 35	2	37	4	3	16	2	43	2	44	4	157
Рс 60	1	40	1	1	14	1	45	1	47	1	152
Рс 64	5	34	9	9	4	5	40	4	38	3	151
Рс 67	15	33	21	24	2	16	30	11	21	6	179

Данные образцы наиболее приспособлены к формированию высокой урожайности в условиях Кировской области, так как характеризуются устойчивостью к изменяющимся условиям произрастания.

Заклучение. По результатам испытаний 47 образцов овса в условиях Кировской области выделены перспективные источники для использования в качестве исходного материала в гибридизации для получения образцов пленчатого овса с востребованными параметрами:

к-13658 Рс 35 (Канада) – стабильный, высокоурожайный, слабоотзывчив на изменения условий произрастания, устойчив к неблагоприятным факторам среды;

к-15530 UFRGS-2 (Бразилия) – стрессоустойчивый, стабильный по урожайности;

к-15547 Скороспелый 1 (Россия), к-15533 UFRGS-8, к-15544 UFRGS-20, к-15546 UFRGS-22 (Бразилия) – отзывчивы на благоприятные условия произрастания;

к-14396 Рс 64, к-13662 Рс 45 (Канада) – устойчивы к неблагоприятным условиям со стабильным уровнем урожайности;

к-15541 UFRGS-17 (Бразилия), к-15586 Мутант 666 (Швеция) – стрессоустойчивые, слабоотзывчивые на улучшение почвенных и климатических условий;

к-14221 Рс 60 (Канада) – стрессоустойчивый, генетически гибкий с низким коэффициентом вариации и высоким уровнем стабильности и гомеостатичности;

к-15542 UFRGS-18 (Бразилия) – высокоурожайный с генетической гибкостью;

к-14648 Аргмак (Россия), к-15583 Мутант 230, к-15585 Мутант 261 (Швеция) – высокоурожайные с высокой генетической гибкостью и отзывчивостью на благоприятные условия выращивания.

Для включения в селекционные программы и возделывания в условиях Кировской области рекомендуются образцы к-15541 UFRGS-17, к-15542 UFRGS-18, к-13662 Рс 45, к-14668 Рс 54, к-13187 Рс-56, к-14431 Рс 59, к-13658 Рс 35, к-14221 Рс 60, к-14396 Рс 64, к-14397 Рс 67 (сумма рангов 152...189). Данным образцам свойственна адаптивность к варьирующим условиям произрастания по признаку «урожайность».

Список литературы

1. Pereira H. S., Alvares R. C., Silva F. C., Faria L. C., Melo L. C. Genetic, environmental and genotype x environment interaction effects on the common bean grain yield and commercial quality. *Semina: Ciencias Agrarias*, Londrina. 2017;38(3):1241-1250. DOI: <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2017v38n3p1241>
2. Жуйкова О. А., Баталова Г. А. Оценка генотипов овса на устойчивость к шведской мухе в условиях Кировской области. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2022;23(5):706-713. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2022.23.5.706-713> EDN: LVHDXW
3. Тулякова М. В., Баталова Г. А., Лоскутов И. Г., Пермякова С. В., Кротова Н. В. Оценка адаптивных параметров коллекционных образцов овса пленчатого по урожайности в условиях Кировской области. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2021;182(1):72-79. DOI: <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2021-1-72-79> EDN: AMHNFZ
4. Войцущая Н. П., Лоскутов И. Г. Селекционная ценность европейских образцов овса в условиях Кубанской опытной станции ВИР. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2019;180(1):52-58. DOI: <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2019-1-52-58> EDN: XDPRXL
5. Юсова О. А., Николаев П. Н., Васюкевич В. С., Анисков Н. И., Сафонова И. В. Уровень качества зерна омских сортов овса ярового в контрастных экологических условиях. *Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет)*. 2020;(2(55)):84-96. DOI: <https://doi.org/10.31677/2072-6724-2020-55-2-84-96> EDN: MTSHKB
6. Драгавцев В. А., Драгавцева И. А., Ефимова И. Л., Маринец А. С., Савин И. Ю. Управление взаимодействием «генотип-среда» – важнейший рычаг повышения урожая сельскохозяйственных растений. *Труды Кубанского государственного аграрного университета*. 2016;(59):105-121.
7. Рябова Н. Н., Николаева Н. Ю., Сорокин И. Б. Статистические характеристики изменчивости урожайности зерновых культур в зависимости от климата. *Вестник Башкирского государственного аграрного университета*. 2020;(4(56)):61-66. DOI: <https://doi.org/10.31563/1684-7628-2020-56-4-61-66> EDN: DKXHWJ
8. Сотник А. Я. Оценка адаптивных свойств сортов овса по урожайности в Приобской лесостепи. *Сибирский вестник сельскохозяйственной науки*. 2023;53(5):40-46. DOI: <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2023-5-5> EDN: WRTNUQ
9. Пакудин В. З., Лопатина Л. М. Оценка экологической пластичности и стабильности сортов сельскохозяйственных культур. *Сельскохозяйственная биология*. 1984;19(4):109-113.
10. Гончаренко А. А. Об адаптивности и экологической устойчивости сортов зерновых культур. *Вестник РАСХН*. 2005;(6):49-53.
11. Зыкин В. А., Белан И. А., Юсов В. С., Недорезков В. Д., Исмагилов Р. Р., Кадиков Р. К., Исламгулов Д. Р. Методика расчета и оценки параметров экологической пластичности сельскохозяйственных растений. *Уфа: БашГАУ*, 2005. 100 с.
12. Хангильдин В. В. Параметры оценки гомеостатичности сортов и селекционных линий в испытании колосовых культур. *Научно-технический бюллетень ВСГИ*. 1986;(2(60)):36-41.
13. Удачин Р. А., Головченко А. П. Методика оценки экологической пластичности сортов пшеницы. *Селекция и семеноводство*. 1990;(5):2-6.
14. Неттевич Э. Д., Моргун А. И., Максименко М. И. Повышение эффективности отбора яровой пшеницы на стабильность, урожайность и качество зерна. *Вестник сельскохозяйственной науки*. 1985;(1):66-73.

References

1. Pereira H. S., Alvares R. C., Silva F. C., Faria L. C., Melo L. C. Genetic, environmental and genotype x environment interaction effects on the common bean grain yield and commercial quality. *Semina: Ciencias Agrarias, Londrina*. 2017;38(3):1241-1250. DOI: <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2017v38n3p1241>
2. Zhuikova O. A., Batalova G. A. Assessment of oat genotypes for resistance to frit fly in the conditions of the Kirov region. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2022;23(5):706-713. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2022.23.5.706-713>
3. Tulyakova M. V., Batalova G. A., Loskutov I. G., Permyakova S. V., Krotova N. V. Assessment of adaptability parameters in hulled oat germplasm accessions in terms of their yield in the environments of Kirov Province. *Trudy po prikladnoy botanike, genetike i selektsii* = Proceedings on applied botany, genetics and breeding. 2021;182(1):72-79. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2021-1-72-79>
4. Voytsutskaya N. P., Loskutov I. G. Breeding value of european oat accessions in the environments of Kuban experiment station of VIR. *Trudy po prikladnoy botanike, genetike i selektsii* = Proceedings on applied botany, genetics and breeding. 2019;180(1):52-58. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2019-1-52-58>
5. Iusova O. A., Nikolaev P. N., Vasiukevich V. S., Aniskov N. I., Safonova I. V. Spring grain quality of omsk oat varieties in the extreme environmental conditions. *Vestnik NGAU (Novosibirskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet)* = Bulletin of NSAU (Novosibirsk State Agrarian University). 2020;(2):84-96. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31677/2072-6724-2020-55-2-84-96>
6. Dragavtsev V. A., Dragavtseva I. A., Efimova I. L., Marinets A. S., Savin I. Yu. Management by "genotype-environment" interaction - most important lever for increase of cultivated plants yields. *Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2016;(59):105-121. (In Russ.).
7. Ryabova N. N., Nikolaeva N. Yu., Sorokin I. B. Statistical characteristics of cereal crop yield variability depending on climate. *Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Vestnik Bashkir State Agrarian University. 2020;(4(56)):61-66. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31563/1684-7628-2020-56-4-61-66>
8. Sotnik A. Y. Evaluation of oat varieties adaptive properties by productivity in the Priobskaya forest-steppe zone. *Sibirskiy vestnik sel'skokhozyaystvennoy nauki* = Siberian Herald of Agricultural Science. 2023;53(5):40-46. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2023-5-5>
9. Pakudin V. Z., Lopatina L. M. Assessment of ecological plasticity and stability of crop varieties. *Sel'skokhozyaystvennaya biologiya* = Agricultural Biology. 1984;19(4):109-113. (In Russ.).
10. Goncharenko A. A. On the adaptability and environmental sustainability of grain crop varieties. *Vestnik RASKhN*. 2005;(6):49-53. (In Russ.).
11. Zykin V. A., Belan I. A., Yusov V. S., Nedorezkov V. D., Ismagilov R. R., Kadikov R. K., Islamgulov D. R. Methodology for calculating and assessing the parameters of ecological plasticity of agricultural plants. Ufa: *BashGAU*, 2005. 100 p.
12. Khangildin V. V. Parameters for assessing the homeostaticity of varieties and breeding lines in the testing of cereal crops. *Nauchno-tekhnicheskyy byulleten' VSGI*. 1986;(2(60)):36-41. (In Russ.).
13. Udachin R. A., Golovchenko A. P. Methodology for assessing the ecological plasticity of wheat varieties. *Selektsiya i semenovodstvo*. 1990;(5):2-6. (In Russ.).
14. Nettevich E. D., Morgunov A. I., Maksimenko M. I. Increasing the efficiency of spring wheat selection for stability, yield and grain quality. *Vestnik sel'skokhozyaystvennoy nauki*. 1985;(1):66-73. (In Russ.).

Сведения об авторах

✉ Кротова Надежда Викторовна, кандидат с.-х. наук, ст. научный сотрудник лаборатории селекции овса, 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: <http://orcid.org/0000-0003-1355-083X>, e-mail: nadja.1979@yandex.ru

Баталова Галина Аркадьевна, доктор с.-х. наук, профессор, академик РАН, главный научный сотрудник, зам. директора, 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: <http://orcid.org/0000-0002-3491-499X>

Information about the authors

✉ Nadezda V. Krotova, PhD in Agriculture, senior researcher, the Laboratory of Oat Breeding, Federal Agricultural Research Center of North-East named N. V. Rudnitsky, 166-a Lenin Street, Kirov, Russian Federation, 610007, e-mail: priemnaya@fanc-sv.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1355-083X>, e-mail: nadja.1979@yandex.ru

Galina A. Batalova, DSc in Agriculture, professor, academician of RAS, chief researcher, deputy director, Federal Agricultural Research Center of North-East named N. V. Rudnitsky, 166-a Lenin Street, Kirov, Russian Federation, 610007, e-mail: priemnaya@fanc-sv.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3491-499X>

✉ – Для контактов / Corresponding author

Сравнение продуктивности растений картофеля при выращивании миниклубней в условиях аэрогидропоники и в горшках с почвенным субстратом

© 2023. О. С. Хутинаев✉

ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр картофеля им. А. Г. Лорха»,
Московская область, Российская Федерация

В статье приведены результаты сравнительных испытаний по выращиванию миниклубней картофеля в тепличной культуре в горшках с почвенным субстратом и в условиях аэрогидропоники без использования твердых субстратов при обработке корневой системы водно-воздушной питательной смесью. Приведены результаты полевого тестирования семенных качеств миниклубней, полученных разными способами. Эксперименты проводили в Московской области на сортах картофеля Фиолетовый и Северное сияние. На основании исследований установлено, что при получении миниклубней картофеля в условиях аэрогидропоники можно существенно увеличить коэффициент размножения семян, повышая количественные характеристики полученного урожая. При выращивании в условиях аэрогидропоники у сорта Северное сияние зафиксировано двукратное увеличение коэффициента размножения и получено в среднем 19,2 миниклубня с растения, в тепличных условиях средний выход составил 9,2 миниклубня. У сорта Фиолетовый коэффициент размножения у аэрогидропонных растений был в 1,8 раза больше, чем у тепличных, и получено 29,1 и 16,1 миниклубня с куста соответственно. В урожае тепличных миниклубней отсутствовали семена мелких фракций, в аэрогидропонных партиях на их долю более 25 % приходилось у сорта Северное сияние и 19 % – сорта Фиолетовый. Фракций крупных семян размером более 30 мм в тепличных партиях было гораздо больше, чем в аэрогидропонных – 49,9 и 1,82 % у сорта Северное сияние, 38,5 и 1,3 % – сорта Фиолетовый соответственно. При сравнительном полевом испытании растений, полученных от посадочных тепличных и аэрогидропонных микроклубней, существенных различий по их продуктивности и коэффициенту размножения не выявлено.

Ключевые слова: водно-воздушная культура, тепличная культура, урожай, качество семян, посадочный материал

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр картофеля им. А. Г. Лорха» (тема №0596-2018-0009).

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

Конфликт интересов: автор заявил об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Хутинаев О. С. Сравнение продуктивности растений картофеля при выращивании миниклубней в условиях аэрогидропоники и в горшках с почвенным субстратом. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2023;24(5):757-766. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.5.757-766>

Поступила: 23.03.2023 Принята к публикации: 07.09.2023 Опубликована онлайн: 30.10.2023

Comparing the productivity of potato plants when growing mini-tubers in the conditions of air hydroponics and in the pots with soil substrate

© 2023. Oleg S. Khutinaev✉

Russian Potato Research Center, Moscow region, Russian Federation

The article provides the results of comparative tests on growing mini-tubers of potato in greenhouse culture using the pots with soil substrate and in the conditions of air hydroponics without hard substrates by treatment of root system with water-air nutrient mixture. The results of field testing of seed qualities of mini-tubers obtained by various methods are given. The experiments were carried out in Moscow region in potato varieties Fioletovy and Severnoe siyanie. On the basis of the research, it has been established that using the method of obtaining mini-tubers in the conditions of air hydroponics it is possible to increase the seed reproduction coefficient raising the quantitative characteristics of the yield. When growing in the conditions of air hydroponics in the Severnoe siyanie variety there was recorded two time increase of reproduction coefficient and obtained 19.2 mini-tubers per plant. At the same time, in greenhouse culture the average yield was 9.2 mini-tubers per plant. In Fioletovy variety, the reproduction coefficient in air hydroponic plants was 1.8 times higher than in greenhouse culture, 29.1 and 16.1 mini-tubers per plant, respectively. In the yield of greenhouse mini-tubers there were no seeds of small fractions, while in air hydroponic parts there were 25 % of them in Severnoe siyanie variety and 19 % in Fioletovy one. The number of fractions of large seeds more than 30 mm in size was much higher in greenhouse parts than in air hydroponic ones, 49.9 % against 1.82 % in Severnoe siyanie variety and 38.5 % against 1.3 % in Fioletovy variety. By comparative field tests of plants obtained from seed greenhouse and air hydroponic mini-tubers there has not been established significant differences in their yield and reproduction coefficient.

Keywords: water-air culture, greenhouse culture, yield, seed quality, planting material

Acknowledgement: the research was carried out under the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of the Russian Potato Research Center (theme № 0596-2018-0009).

The author thanks 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: Khutinaev O. S. Comparing the productivity of potato plants when growing mini-tubers in the conditions of air hydroponics and in the pots with soil substrate. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2023;24(5):757-766. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.5.757-766>

Received: 23.03.2023 Accepted for publication: 07.09.2023 Published online: 30.10.2023

Традиционное производство миниклубней картофеля основано на выращивании пробирочных растений в тепличных условиях на грядках или в горшках с почвенным субстратом [1]. Горшечный способ является трудоемким и требует довольно высоких финансовых затрат, при этом коэффициент размножения остается низким, составляя в среднем 8-10 миниклубней с растения [2]. С целью увеличения продуктивности растений и выхода миниклубней с единицы площади разными исследователями предпринимались попытки использования новых методов выращивания исходных растений. В экспериментальных исследованиях с 1 м² получено более 3 тыс. миниклубней картофеля весом от 0,125 до 4,000 г при сборе урожая через 4, 7 и 10 недель. Выход миниклубней повышали за счет применения при первых двух сборах неразрушающего способа подъема растений из почвы, после чего их снова высаживали по уплотненной схеме [3].

Наряду с технологиями, связанными с культивированием маточных растений в почвенной среде, активно начали внедряться альтернативные способы, например, выращивание в контейнерах с использованием различных субстратных смесей [4] или в условиях гидропоники [5]. Новые технологии позволили не только увеличить количественные показатели урожая, но и привели к существенной экономии площадей, водных ресурсов, техники и сопутствующих материалов. Наиболее популярные способы получения миниклубней по новым технологиям – это выращивание в условиях гидропоники и аэропоники [6]. Довольно значимые результаты при производстве миниклубней картофеля были получены при использовании гидропонных систем Nutrient Film Technique (NFT-технологии) на твердых субстратах (перлит, вермикулит) и без них [7]. Помимо этого, выявлена более высокая интенсивность клубнеобразования в пористых средах, чем без использования твердых субстратов в

жидкой питательной среде [8]. Использование гидропонных систем выявило важную особенность растений – способность производить большое количество миниклубней, прежде всего на аэропонных системах [5, 9]. По мнению исследователей, количественное увеличение урожая в гидропонике происходит за счет повышения доступности воды и питательных веществ, при этом клубни имеют высокое качество за счет отсутствия почвенных патогенов и неблагоприятных физико-химических свойств почвы [10].

Совершенствование гидропонных систем привело к возникновению еще более высокотехнологичного аэропонного способа выращивания, полностью исключающего использование твердых субстратов, при котором корни развиваются в воздушном пространстве при обработке водно-воздушной питательной смесью. В качестве новых альтернативных систем выращивания были продемонстрированы аэропонные устройства, в которых корневая система растений помещается в темную камеру, куда под давлением с помощью туманообразующего устройства подается раствор воды и минеральных веществ [6]. Корейскими исследователями была представлена успешная модель аэропонной системы для производства семенного картофеля в тропических и субтропических условиях [11, 12]. Сравнительные испытания аэропонных и гидропонных систем показали высокую жизнеспособность растений со значительным коэффициентом размножения и лучшим развитием растений в аэропонных системах [13, 14]. Было отмечено, что в условиях аэрогидропоники происходит бурное развитие корней и интенсивный рост столонов в водно-воздушной питательной среде, чему, вероятнее всего, способствует отсутствие механического сопротивления, которое присутствует при выращивании на твердых субстратах [15]. Было отмечено и то, что чрезмерное развитие столонов приводит к некоторой задержке клубнеобразования, а достаточно

хорошее их развитие позволяет более продолжительное время продуцировать большее количество клубней [15].

На увеличение урожайности в аэрогидропонных системах может оказывать влияние также более высокая плотность посадок и возможность многократной уборки урожая. Благодаря периодической уборке значительно повышается коэффициент размножения, что можно объяснить улучшенным перераспределением питательных веществ [16]. Удаление доминирующих крупных клубней позволяет инициировать зарождение новых и ускорение развития уже зародившихся клубней [3].

В аэропонных системах максимально оптимизируется процесс поглощения питательных веществ корнями растений за счет их активной аэрации водно-воздушной питательной смесью, что, безусловно, является основным фактором, приводящим к увеличению урожайности по сравнению с классическими гидропонными, и тем более с традиционными системами выращивания [17].

Опираясь на приведенные данные вышеуказанных исследований, можно сказать, что создание условий для развития корневой системы в регулируемой среде обитания положительно сказывается на скорости роста и развития культивируемых растений и позволяет резко повышать количественные показатели урожая. Еще одним важным условием повышения коэффициента размножения является своевременная многоэтапная уборка поспевающих клубней, которая инициирует новые процессы клубнеобразования, пролонгируя цикл зарождения и роста клубней вплоть до завершения вегетации.

Такой подход к ведению культуры можно организовать только в специальных устройствах выращивания растений в контролируемой среде без использования твердых субстратов, ограничивающих свободный доступ к корням и развивающимся клубням. Замкнутая система таких устройств обеспечивает растения постоянным питанием из собственного резервуара с раствором, содержащим оптимальный состав питательных веществ, оптимизируя режим питания на всех этапах развития.

Такая система позволяет легко и быстро заменять питательный раствор и контролировать необходимый состав питательных веществ на каждой стадии развития. Корневая система в таких устройствах развивается в свободном от твердых субстратов пространстве, насыщенном водно-воздушной питательной смесью, и развивается гораздо быстрее, образуя большую массу корней и количество клубнеобразующих столонов. Принимая во внимание вышесказанное, возникает необходимость проведения дополнительных исследований для определения отзывчивости разных сортов картофеля на оптимизацию условий выращивания миниклубней.

Цель исследований – изучить сравнительную эффективность получения миниклубней различных сортов картофеля при выращивании растений в тепличной культуре (в горшках с почвенным субстратом) и в условиях аэрогидропонии. Провести полевое тестирование продуктивности сортов картофеля в зависимости от способа выращивания посадочных миниклубней.

Научная новизна – на различных сортах картофеля показана эффективность производства исходного посадочного материала в зависимости от способов получения миниклубней.

Материал и методы. Сравнительные испытания исследуемых способов получения миниклубней картофеля проходили при использовании репликантов двух сортов отечественной селекции, полученных в условиях *in vitro* на модифицированной среде Мурасиге-Скуга (Murashige & Skoog, 1962)¹. При проведении тестов в аэрогидропонной культуре пробирочные растения после выемки из пробирок отмывали от агаровой среды и сразу же высаживали на аэрогидропонные модули. При тестировании в горшечной культуре микрорастения высаживали сразу в горшки с землей без отмыкания от агаровой среды. Дальнейшее культивирование обоих способов проходило в условиях *in vivo* при естественном солнечном освещении в пленочных теплицах, расположенных на экспериментальной площадке Федерального исследовательского центра картофеля им. А. Г. Лорха (Московской область, Россия).

¹Murashige T., Skoog F. A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue cultures. *Physiol. Plant.* 1962;(15):473:497.

Тепличная культура. Тестирование проводили в 2020 году с 15 апреля по 15 августа на сортах разной группы спелости – Северное сияние (среднеспелый) и Фиолетовый (среднепоздний). Выращивание миниклубней проводили в 5-литровых горшках с торфо-почвенной смесью, заправленной специализированным комплексным азотно-фосфорно-калийным удобрением с микроэлементами – PG mix (12-14-24+2+14+micro)² в соотношении 2 кг на 1 м³ торфяно-почвенной смеси. Плотность расстановки горшков – 16 шт. на 1 м². Полив проводили с помощью мелкодисперсных форсунок через каждые 2-3 дня (в зависимости от погоды) по 2 часа в сутки. Обработку фунгицидами и инсектицидами осуществляли по мере необходимости согласно регламенту профилактических мероприятий. Через 16 недель цикл вегетации был завершен. За три недели до уборки проводили десикацию ботвы контактным фунгицидом Ширма.

Для сравнения семенных качеств между тепличными и аэрогидропонными миниклубнями при выращивании их в полевом питомнике по каждому сорту собирали урожай с четырех репрезентативных участков площадью 1 м² по 10 растений (40 растений каждого сорта). Клубни в партиях разделяли по фракциям до 35 мм и более. Урожайность и количество клубней регистрировали в каждой повторности. Соразмерные фракции, собранные со всех участков (повторов), объединяли в одну партию.

Аэрогидропонная культура. Исследования проводили на сортах Северное сияние и Фиолетовый в 2020 году с 1 мая по 30 сентября. Растения развивались в тепличных условиях при естественном солнечном освещении. Каждого сорта высаживали 180 растений в 3-кратной повторности по 60 растений на аэрогидропонный модуль АГМ-60. Плотность посадок составляла 60 растений на 1,08 м² по схеме 15х12 см. Вода и питательные элементы подавали к корням в виде водно-воздушной питательной смеси за счет 28 туманообразующих форсунок с распылом на 360 градусов. Производительность форсунки составляла 6 л/час при давлении 2,0 бар, общая производительность форсунок в модуле – 168 л/ч. Подачу водно-воздушной питательной смеси обеспечивал вихревой насос мощностью 0,37 кВт,

производительностью 2400 л/ч. Каждый ряд форсунок опрыскивал по два ряда саженцев.

Растения на этапах развития и плодоношения получали разные питательные растворы. После завершения стадии развития и переходе к фазе «клубнеобразование» старый раствор полностью сливали и заменяли новым с увеличенным содержанием калия и фосфора. В первую фазу развития растений частота опрыскивания корней составляла 45 секунд через каждые 10 минут питательной смесью (мг/л): N(190), P(30), K(230), Ca(90), Mg(21), S(50), способствующей быстрому развитию вегетативной массы. На этапе клубнеобразования режим подачи питательной жидкости изменили – 45 секунд через каждые 20 минут, раствор заменили на новый N(180), P(50), K(285), Ca(150), Mg(35), S(80). Содержание микроэлементов в питательном растворе поддерживали согласно прописи Мурасиге-Скуга (мг/л) – B(6,2), Mn(22,3), Zn(8,6), CuO(0,25), Mo(0,25), Co(0,025), I(0,83), Fe(5,58).

После достижения саженцами высоты 15 см их углубляли на одно междоузлие, после повторного достижения 15 см проводили еще одно углубление на одно междоузлие. Для предупреждения полегания стеблей, после достижения растениями высоты 20 см, над посадками натягивали сетку из шпагата таким образом, чтобы каждое растение проходило в отдельную ячейку. Всего за вегетацию натягивали 4 яруса сетки через каждые 15-20 см.

Тепличные растения, развивающиеся в горшках с почвенным субстратом, завершили вегетацию через 122 дня. Сбор урожая проводили 15 августа.

Срок вегетации аэрогидропонных растений длился 152 дня, до октября. Сбор урожая миниклубней проходил в пять этапов. Первый сбор проведен 30 августа, когда основная масса клубней соответствовала размеру 20-30 мм. Критерий очередного сбора урожая миниклубней – достижение ими фракции 20-25 мм. Уничтожаемые при последней уборке кусты были в достаточно хорошем состоянии – с развитыми листьями и интенсивным образованием на столонах молодых микроклубней размером от 1 до 3 мм, которые потенциально могли бы дорасти до требуемых размеров. При последнем сборе урожая учитывали все собранные клубни – от 9 мм и более.

²Комплексное удобрение PG MIX. Peter Peat. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.peterpeat.ru/agroeconomy/cart/substraty-po-individualnoj-retcepture/kompleksnoe-udobrenie-pg-mix/> (Дата обращения: 10.03.2023).

Для проведения полевых испытаний из общего урожая, полученного обоими способами выращивания, откладывали по 150 штук клубней каждого сорта из фракции семян размером 20-35 мм.

Сравнительное полевое тестирование семенных качеств клубней сортов картофеля Северное сияние и Фиолетовый, выращенных из миниклубней по традиционной и аэрогидропонной технологиям, проводили в 2021 году на опытной базе «Коренево» Федерального исследовательского центра картофеля имени А. Г. Лорха.

Почва дерново-подзолистая с низким содержанием гумуса – 1,8...1,9 %, высоким подвижного фосфора – 269...278 мг/кг почвы и средним содержанием обменного калия – 128...130 мг/кг почвы (по Кирсанову). Уход за растениями и обработку посадок проводили в соответствии с требованиями к питомникам

первого полевого поколения. Посадку проводили на глубину 8...10 см по схеме 75×30 см с плотностью 44 тыс. шт/га. Минеральные удобрения (азофоска+калмагнезия) вносили локально в апреле в дозе N₆₀P₆₀K₉₀ при нарезке гребней и через две недели после всходов в дозе N₃₀P₃₀K₄₅. Посадку клубней фракций 20-35 мм (по 150 шт. каждого сорта в варианте опыта) осуществляли в трех повторностях по 50 шт. на делянке в два ряда (по 25 шт.). Площадь делянки – 25 м². Урожай убирали 15 августа. Фенологические наблюдения и биометрические измерения растений картофеля проводили по общепринятой методике³. Урожайные данные обрабатывали с помощью дисперсионного анализа по Б. А. Доспехову⁴.

Результаты и их обсуждение. Тепличные растения. Результаты урожая миниклубней при выращивании сортов картофеля в тепличной культуре представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Количественный выход миниклубней при выращивании сортов картофеля в тепличной культуре (срок вегетации – с 15 мая по 15 августа 2020 г.)

Table 1 – Quantitative yield of mini-tubers when growing potato varieties in greenhouse culture (growing season - from May 15 to August 15, 2020)

Сорт / Variety	Получено миниклубней с 64 растений, шт. / Mini-tubers obtained from 64 plants, pcs.	Фракция клубней, мм / Tuber fraction, mm				Коэффициент размножения, шт. с растения / Reproduction coeffi- cient, pcs. per plant
		25-35		>35		
		шт. / pcs.	%	шт. / pcs.	%	
Северное сияние / Severnoe siyanie	589	294	49,9	295	50,1	9,2
Фиолетовый / Fioletovy	1032	397	38,5	635	61,5	16,1

Из данных таблицы 1 следует, что урожай миниклубней был сравнительно выравнен по размерным характеристикам. Большую часть составляли клубни размером более 35 мм, остальные были в пределах 25-35 мм. Относительно высокий коэффициент размножения у сорта Фиолетовый объясняется сортовыми особенностями и способностью образовывать большое количество семян в клубневом гнезде. Сорт Северное сияние не обладает подобными свойствами.

Аэрогидропонные растения. В ходе развития аэрогидропонных растений наблюдали гораздо более существенный рост и развитие листостебельной массы и корней в сравнении с тепличными растениями. Столоны были хорошо развиты, их длина варьировала от 50 до 120 см. Растения достигали в высоту 150 см и более (рис. 1), в полтора раза выше тепличных (максимальная 110 см).

Данные структуры урожая, получаемого во время проведения поэтапных сборов, приведены в таблице 2.

³Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. В 7 вып. Гос. комиссия по сортоиспытанию с.-х. культур при Мин-ве сел. хоз-ва СССР. Вып. 1: Общая часть. М.: Колос, 1971. 248 с.

⁴Доспехов Б. А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). 5-е изд., доп. и перераб. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.



Северное сияние / Severnoe siyanie

Фиолетовый / Fioletovy

Рис. 1. Внешний вид сортов картофеля, выращиваемых на аэрогидропонных установках /

Fig. 1. Appearance of potato varieties grown in air hydroponic systems

Поэтапная уборка миниклубней по мере достижения фракции 20-25 см способствовала получению максимально однородного посадочного материала. У сорта Северное сияние от 180 растений получили 3460 миниклубней. На общую долю стандартных клубней размером от 20 до 35 мм приходилось 72,91 % (6,01, 19,68 и 47,22 %), размером более 35 мм – 1,82 %, менее 15 мм – 25,26 %. У сорта Фиолетовый от 180 растений получили 5232 миниклубня. Преобладали стандартные клубни размером от 20 до 35 мм – 79,66 % (3,65, 15,86

и 60,15 %), фракция клубней более 35 мм составила 1,3 %, и пятая часть урожая с долей 19,04 % приходилась на миниклубни размером менее 15 мм.

Существенный прирост количества мелких клубней получили при последнем сборе, так как они не успели дорасти до требуемых размеров. Переросшие клубни отмечены только во время первого сбора, они сформировались первыми, до наступления момента массового клубнеобразования и успели вырасти до различных размеров – до 40-45 мм (рис. 2).

Таблица 2 – Количественный выход миниклубней различных фракций при выращивании сортов картофеля в условиях аэрогидропоники, шт. (2020 г.) /

Table 2 – Quantitative yield of mini-tubers of various fractions when growing potato varieties under air hydroponic conditions, pcs. (2020)

Срок уборки / Harvesting time	Фракция клубней, мм / Tuber fraction, mm					Всего / Total
	>35	30-35	25-30	20-25	до 15	
Северное сияние / Severnoe siyanie						
30 августа / August 30	39	17	12	59	0	127
3 сентября / September 3	0	7	0	176	0	183
10 сентября / September 10	0	0	0	204	0	204
20 сентября / September 20	0	0	115	193	76	384
1 октября / October 1	24	184	554	1002	798	2562
Всего собрано / Total collected	63	208	681	1634	874	3460
Процент выхода / Percentage of output	1,82	6,01	19,68	47,22	25,26	100
Коэффициент размножения / Reproduction coefficient	-	-	-	-	-	19,2
Фиолетовый / Fioletovy						
30 августа / August 30	64	56	88	241	16	465
3 сентября / September 3	0	9	64	95	2	170
10 сентября / September 10	0	0	0	594	0	594
20 сентября / September 20	0	0	301	884	113	1298
1 октября / October 1	4	126	377	1333	865	2705
Всего собрано / Total collected	68	191	830	3147	996	5232
Процент выхода / Percentage of output	1,30	3,65	15,86	60,15	19,04	100
Коэффициент размножения / Reproduction coefficient	-	-	-	-	-	29,1

Примечание: Исходное количество растений для размножения – 180 шт. /

Note: The initial number of plants for propagation is 180 pcs.



**Рис. 2. Размер миниклубней сортов картофеля, полученных в аэрогидропонной культуре /
Fig. 2. Size of mini-tubers of potato varieties obtained in air hydroponic culture**

Сравнение результатов урожайности по тестируемым способам выращивания миниклубней выявил существенную разницу по количественным характеристикам урожая.

В таблице 3 представлены сводные данные по урожаю миниклубней, полученных по тепловой и аэрогидропонной технологиям.

Таблица 3 – Коэффициент размножения и структурный состав урожая миниклубней сортов картофеля в условиях аэрогидропоники и тепличной культуре (2020 г.) /

Table 3 – Reproduction coefficient and structural composition of the yield of mini-tubers of potato varieties under conditions of air hydroponics and greenhouse culture (2020)

<i>Copt / Variety</i>	<i>Способ получения / Method of obtaining</i>	<i>Коэффициент размножения, шт/раст. / Reproduction coefficient, pcs/plant.</i>	<i>Выход миниклубней по фракциям, % / Yield of mini-tubers by fractions, %</i>		
			<i><15 мм / <15 mm</i>	<i>20-35 мм / 20-35 mm</i>	<i>>35 мм / >35 mm</i>
Северное сияние / Severnoe siyanie	Аэрогидропоника / Air hydroponics	19,2	25,26	72,91	1,82
	Теплица / Greenhouse	9,2	0	50,10	49,90
Фиолетовый / Fioletovy	Аэрогидропоника / Air hydroponics	29,1	19,04	79,66	1,33
	Теплица / Greenhouse	16,1	0	61,50	38,50

При выращивании в условиях аэрогидропоники у сорта Северное сияние зафиксировано двукратное увеличение коэффициента размножения и получено в среднем 19,2 штук миниклубней с растения, от тепличных растений – 9,2 штук. У сорта Фиолетовый коэффициент размножения в условиях аэрогидропоники в 1,8 раза превышал показатель тепличного способа и составил 29,1 и 16,1 штук соответственно.

Отмечено, что в урожае от тепличных растений не было мелких клубней, в урожае аэрогидропонных партий их доля составила 25,26 % у сорта Северное сияние и 19,04 % –

сорта Фиолетовый. Клубни тепличных партий отличались более полной зрелостью и крупными размерами в общей массе урожая. Крупных семян размером более 30 мм в тепличных партиях было гораздо больше, чем в аэрогидропонных – 49,90 и 1,82 % у сорта Северное сияние, 38,50 и 1,33 % – сорта Фиолетовый.

Полевые испытания. Сравнительный анализ данных при полевом тестировании семенных качеств миниклубней, полученных по традиционной и аэрогидропонной технологиям, не выявил особых различий в процессе роста и развития растений (табл. 4).

Таблица 4 – Фенологические наблюдения и биометрические показатели роста и развития растений картофеля, выращенных из аэрогидропонных и тепличных миниклубней (полевой опыт, 2021 г.) /

Table 4 – Phenological observations and biometric indicators of growth and development of potato plants grown from air hydroponic and greenhouse mini-tubers (field experiment, 2021)

<i>Copt / Variety</i>	<i>Способ выращивания / Method of growing</i>	<i>Кол-во дней от посадки до / Number of days from planting to</i>			<i>Высота растений, см / Plant height, cm</i>	<i>Среднее кол-во стеблей, шт. / Average no. stems, pcs.</i>
		<i>всходов / shoots</i>	<i>бутонизации / budding</i>	<i>цветения / flowering</i>		
Северное сияние / Severnoe siyanie	Аэрогидропоника / Air hydroponics	21	32	39	46,5	4
	Теплица / Greenhouse	21	32	38	47,0	4
Фиолетовый / Fioletovy	Аэрогидропоника / Air hydroponics	23	41	50	53,6	4
	Теплица / Greenhouse	23	41	50	55,9	4

У сорта Северное сияние всходы во всех вариантах появились на 21 день, сорта Фиолетовый – на 23 день. По срокам наступления фаз бутонизации и цветения и количеству образовавшихся в кусте стеблей существенных отличий не наблюдали.

Для регистрации результатов тестирования в каждой делянке отбирали по десять наиболее развитых растений. Выкапываемые

с каждого куста клубни объединяли в общие партии, данные представлены в таблице 5.

Анализ показателей продуктивности растений по количеству полученных от одного растения семян выявил незначительную тенденцию увеличения коэффициента размножения у растений, выращенных из тепличных миниклубней (табл. 6).

Таблица 5 – Продуктивность растений картофеля в питомнике первого полевого поколения в зависимости от способа выращивания миниклубней (2021 г.) /

Table 5 – Productivity of potato plants in the nursery of the first field generation, depending on the method of growing mini-tubers (2021)

Сорт / Variety	Способ выращивания / Method of growing	Продуктивность растений по пробным копкам, г/куст / Plant productivity according to test diggings, g/bush				
		1	2	3	4	среднее / average
Северное сияние / Severnoe siyanie	Аэрогидропоника / Air hydroponics	0,501	0,457	0,396	0,425	0,445
	Теплица / Greenhouse	0,468	0,333	0,497	0,354	0,413
	HCP ₀₅ / LSD ₀₅	-	-	-	-	0,153
Фиолетовый / Fioletovy	Аэрогидропоника / Air hydroponics	0,360	0,426	0,398	0,456	0,410
	Теплица / Greenhouse	0,358	0,337	0,456	0,381	0,383
	HCP ₀₅ / LSD ₀₅	-	-	-	-	0,109

Таблица 6 – Коэффициент размножения миниклубней картофеля в питомнике первого полевого поколения (2021 г.) /

Table 6 – Reproduction coefficient of potato mini-tubers in the first field generation nursery (2021)

Сорт / Variety	Способ выращивания / Method of growing	Количество клубней в кусте по пробным копкам, шт/куст / Number of tubers under a bush according to trial diggings, pcs/bush				
		1	2	3	4	среднее / average
Северное сияние / Severnoe siyanie	Аэрогидропоника / Air hydroponics	11,5	8	9,9	10,1	9,9
	Теплица / Greenhouse	10,7	9,8	8,9	11,3	10,2
	HCP ₀₅ / LSD ₀₅	-	-	-	-	2,25
Фиолетовый / Fioletovy	Аэрогидропоника / Air hydroponics	14,1	14,6	15,8	13,9	14,6
	Теплица / Greenhouse	15,1	16,1	14,2	15,6	15,3
	HCP ₀₅ / LSD ₀₅	-	-	-	-	2,44

Закключение. В условиях аэрогидропоники, в сравнении со способом получения миниклубней в тепличной культуре, наряду с более интенсивным развитием вегетативной массы увеличивается и продолжительность вегетации, протекающая без каких-либо особых признаков увядания листостебельной части. Этому способствует оптимизированный режим питания с достаточным количеством веществ в питательном растворе. В соответствии с этим, растягивается и продолжительность процесса клубнеобразования, что дает возможность растениям сформировать количество семян, превышающее урожай микроклубней в полтора-два раза и более от тепличных растений. У сорта Северное сияние зафиксировано двукратное увеличение коэффициента размножения и получено в среднем 19,2 штук с растения, в тепличных условиях этот показатель – на уровне 9,2 миниклубня с растения. У сорта Фиолетовый коэффициент размножения аэрогидропонных растений в 1,8 раза выше, чем

тепличных – 29,1 и 16,1 штук с куста соответственно. В полевых испытаниях существенных различий в значениях коэффициента размножения между сравниваемыми вариантами не наблюдали. От аэрогидропонных миниклубней сорта Северное сияние в кусте получили в среднем 9,9 семян против 10,2 штук тепличных, сорта Фиолетовый – 14,6 и 15,3 штук соответственно.

При сравнении семенных качеств клубней картофеля, полученных в полевых условиях от посадочных аэрогидропонных и тепличных миниклубней, не было выявлено существенных различий ни в развитии растений, ни в количестве получаемого урожая. Можно отметить, что более развитые растения от посадочных тепличных миниклубней обладали большим потенциалом продуктивности в посадках первого полевого поколения, однако на этапе выращивания их с одного и того же количества исходных растений аэрогидропонный способ позволяет получить в 1,5-2 раза большее количество миниклубней по сравнению с теплич-

ным способом выращивания в горшках. Следовательно, полученный урожай от аэрогидропонных растений может занять в 1,5-2,0 раза больше площадей, удваивая тем самым и количество посадочного материала в первом полевом поколении.

Представленные результаты позволяют сделать вывод, что аэрогидропонный способ получения миниклубней дает возможность увеличить эффективность производства исходного посадочного материала картофеля в системе оригинального семеноводства.

References

1. Wiersema S. G., Cabello R., Tovar P., Dodds J. H. Rapid seed multiplication by planting into beds micro tubers and in vitro plants. *Potato Research* 1987;30:117-120. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02357690>
2. Анисимов Б. В., Хутинаев О. С., Марзоев З. А., Карданова И. С. Традиционные и альтернативные технологии выращивания клубней мини-картофеля. В кн.: Селекция и семеноводство картофеля: монография. Чебоксары, 2020. С. 83-98.
3. Anisimov B. V., Khutinaev O. S., Marzoev Z. A., Kardanov I. S. Traditional and alternative technologies for growing mini-potato tubers. In the book: Selection and seed production of potatoes: monograph. Cheboksary, 2020. pp. 83-98.
3. Lommen W. J. M. Basic studies on the production and performance of potato minitubers. Doctoral thesis, Wageningen Agricultural University, Wageningen, The Netherlands, 1995. 181 pp. URL: <https://edepot.wur.nl/205994>
4. Jones E. D. A current assessment of in vitro culture and other rapid multiplication methods in North America and Europe. *American Potato Journal*. 1988;65(4):209-220. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02854453>
5. Muro J., Díaz V., Goñi J. L., Lamsfus G. Comparison of hydroponic culture and culture in a peat/sand mixture and the influence of nutrient solution and plant density on seed potato yields. *Potato Research*. 1997;40:431-438. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02358003>
6. Садбеков Д. Ж., Ахметов С. Г., Отто А. С., Демчук Е. В. Аэро-гидропоника. Роль научно-исследовательской работы обучающихся в развитии АПК: сб. Всеросс. (национальной) научн.-практ. конф. Омск: Омский ГАУ имени П. А. Столыпина, 2020. С. 265-268. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42620748&pff=1> EDN: GSEPOJ
6. Sadbekov D. Zh., Akhmetov S. G., Otto A. S., Demchuk E. V. Aero hydroponics. The role of students' research work in the development of the agro-industrial complex: collection of articles. All-Russian (national) scientific and practical conf. Omsk: *Omskiy GAU imeni P. A. Stolypina*, 2020. С. 265-268. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42620748&pff=1>
7. Wheeler R. M., Hinkle C. R., Mackowiak C. L., Sager J. C., Knott W. M. Potato growth and yield using nutrient film technique (NFT). *American Potato Journal*. 1990;67:177-187. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02987070>
8. Wan W. Y., Cao W., Tibbitts T. W. Tuber initiation in hydroponically grown potatoes by alteration of solution pH. *American Society for Horticultural Science*. 1994;29(6):621-623. DOI: <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.29.6.621>
9. Ritter E., Angulo B., Riga P., Herrán C., Lelloso J., San Jose M. Comparison of hydroponic and aeroponic cultivation systems for the production of potato minitubers. *Potato Research*. 2001;44:127-135. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02410099>
10. Morard P. Les cultures v6g6tales hors sol. Publications Agricoles Agen, France, 1995. pp.12-13.
11. Kang J. G., Yang S. Y., Kim S. Y. Effects of nitrogen levels on the plant growth, tuberization and quality of potatoes grown in aeroponics. *Journal of the Korean Society for Horticultural Science (Korea Republic)*. 1997;37:761-766.
12. Kim K. T., Kim S. B., Ko S. B., Park Y. B. Effects of mini-tuber picking intervals on the yield and tuber weight of potato grown in aeroponics. *RDA Journal of Horticulture Science (Korea Republic)*. 1997;39:65-69.
13. Otazu V. Manual on Quality Seed Potato Production Aeroponics. International potato Centre (CIP): Lima, Peru, 2010. 44 p.
14. Chang D. C., Park C. S., Kim S. Y., Lee Y. B. Growth and Tuberization of Hydroponically Grown Potatoes. *Potato Research*. 2012;55:69-81. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11540-012-9208-7>
15. Lugt C., Bodlaender K. B. A., Goodijk G. Observation on the induction of second growth in potato tubers. *European Potato Journal*. 1964;7:219-227. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02368253>
16. Farran I., Mingo-Castel A. M. Potato minituber production using aeroponics: Effect of plant density and harvesting intervals. *American Potato Journal*. 2006;83:47-53. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02869609>
17. Хутинаев О. С., Анисимов Б. В., Юрлова С. М., Мелешин А. А. Мини-клубни методом аэрогидропонии. Картофель и овощи. 2016;(11):28-30. Режим доступа: http://potatoveg.ru/wp-content/uploads/2013/03/%E2%84%9611_2016.pdf
17. Khutinaev O. S., Anisimov B. V., Yurlova S. M., Meleshin A. A. Mini-tubers by aeroand hydroponic method. *Kartofel' i ovoshchi = Potato and Vegetables*. 2016;(11):28-30. (In Russ.). URL: http://potatoveg.ru/wp-content/uploads/2013/03/%E2%84%9611_2016.pdf

Сведения об авторе

✉ Хутинаев Олег Сосланбекович, кандидат с.-х. наук, старший научный сотрудник отдела технологии и инновационных проектов, ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр картофеля им. А. Г. Лорха», ул. Лорха, д. 23, литера «В», д.п. Красково, г.о. Люберцы, Московская область, Российская Федерация, 140051, e-mail: mail@potatocentre.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1487-4038>, e-mail: okosk@mail.ru

Information about the author

✉ Oleg S. Khutinaev, PhD in Agricultural Science, senior researcher, the Department of Technology and Innovative Projects, Russian Potato Research Centre, 23 «B», Lorkh Street, Kraskovo, Lyubertsy, Moscow region, Russian Federation, 140051, e-mail: mail@potatocentre.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1487-4038>, e-mail: okosk@mail.ru

✉ – Для контактов / Corresponding author

Метод ISSR-маркирования в исследовании генетического разнообразия сортов льна

© 2023. Т. А. Базанов✉, И. В. Ушаповский, Н. Н. Логинова, Е. В. Смирнова, П. Д. Михайлова

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

Генетическое разнообразие сортов сельскохозяйственных культур необходимо оценивать с привлечением современных молекулярных маркеров. Одним из наиболее перспективных и простых методов генетического анализа растений является межмикросателлитное маркирование (ISSR). Целью данного исследования является изучение полиморфизма сортов прядильного и масличного льна, включенных в Государственный реестр селекционных достижений Российской Федерации, а также стародавних кражевых форм льна-долгунца с использованием ISSR-маркеров. Объектом исследования служили 83 образца из коллекции Федерального научного центра лубяных культур, из них 24 сорта льна масличного, 56 сортов льна-долгунца отечественной и зарубежной селекции и три кражевые формы из Центрального Нечерноземья. Генетический анализ проводили методом ПЦР с использованием набора из 25 ISSR-праймеров, детекцию продуктов амплификации – с помощью электрофореза в 1,5%-ном агарозном геле. Основываясь на внутривидовом разделении льна на масличные и прядильные формы, кластерный анализ по результатам ISSR-маркирования был проведен не в объединенной совокупности образцов, а независимо в каждой из двух групп, что позволяет повысить надежность выводов о существующих зависимостях. Дендрограммы генетического подобия исследованных образцов масличного и прядильного льнов рассматривались отдельно друг от друга. В результате проведенного анализа выявлено, что сорта масличного льна разделены на пять кластеров. Установлены зависимости, связанные с их происхождением (оригинатором сорта) и содержанием масла в семени. Дендрограмма сортов льна-долгунца и его кражевых форм выявила три основные неравномерные по составу группы, включающие 12 подкластеров. Практически каждая группа имеет свою характерную особенность, не связанную с географией происхождения. Группировка сортов произошла, преимущественно, на основании различных их характеристик по содержанию льноволокна, срокам созревания и устойчивости к стрессовым факторам среды. Результаты исследования показали на целесообразность использования ISSR-маркеров в качестве адекватного и доступного метода для разработки элементов маркер-ассоциативной селекции лубяных культур.

Ключевые слова: лен, молекулярные маркеры, ISSR, ПЦР, генетический полиморфизм, селекция

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный научный центр лубяных культур» (тема № 0477-2019-0023).

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., Смирнова Е. В., Михайлова П. Д. Метод ISSR-маркирования в исследовании генетического разнообразия сортов льна. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2023;24(5):767-776. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.5.767-776>

Поступила: 24.04.2023

Принята к публикации: 19.09.2023

Опубликована онлайн: 30.10.2023

Method of ISSR-marking in the study of genetic diversity of flax varieties

© 2023. Taras A. Bazanov✉, Igor V. Ushapovsky, Natalya N. Loginova, Ekaterina V. Smirnova, Polina D. Mikhaylova

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

The genetic diversity of crop varieties should be assessed using modern molecular markers. One of the most promising and simple methods of plant genetic analysis is intermicrosatellite labeling (ISSR). The purpose of this research is to study the polymorphism of varieties of fiber flax and linseed flax included in the State Register of Breeding Achievements of the Russian Federation, as well as local forms of fiber flax using ISSR markers. The objects for the research were 83 samples from the collection of the Federal Research Center for Bast Fiber Crops, among them 24 varieties of linseed flax, 56 varieties of fiber flax of domestic and foreign breeding, and three local forms from the Central Non-Black Earth Region. Genetic analysis was carried out by PCR method using a set of 25 ISSR primers. Detection of amplification products was carried out using electrophoresis in 1.5% agarose gel. Based on intraspecific selection of flax varieties to oilseed and fiber forms, a cluster analysis was performed according to the results of ISSR labeling independently in each of two groups that allowed to increase the reliability of conclusions on the existing dependences. Dendrograms of the genetic similarity of the studied samples of linseed flax and fiber flax were studied independently from each other. As a result of the analysis, linseed flax varieties were divided into five clusters, which made it possible to establish dependencies related to their origin (originator of the variety) and oil content in the seed. The dendrogram which included varieties of fiber flax and its local forms, revealed twelve subclusters forming three uneven groups. Almost every group had its own characteristic feature, not related to the geography of origin. The grouping of varieties occurred mainly on the basis of their various characteristics in terms of flax fiber content, ripening time and resistance

to environmental stress factors. The results of the research show the applicability of using the ISSR-markers as a valid and accessible method for developing the elements of marker-associative breeding of bast fiber crops.

Keywords: flax, molecular markers, ISSR, PCR, genetic polymorphism, breeding

Acknowledgments: the research was carried out under the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of the Federal Research Center for Bast Fiber Crops (topic № 0477-2019-0023).

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: Bazanov T. A., Uschapovsky I. V., Loginova N. N., Smirnova E. V., Mikhaylova P. D. Method of ISSR-marking in the study of genetic diversity of flax varieties. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2023;24(5):767-776. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.5.767-776>

Received: 24.04.2023

Accepted for publication: 19.09.2023

Published online: 30.10.2023

Лен – традиционно входящая в структуру посевов Российской Федерации культура, которая в зависимости от ботанической формы и хозяйственного назначения классифицируется как прядильный или масличный лен. В последнее десятилетие в России площадь возделывания льна-долгунца составляет порядка 50 тыс. га, масличного льна – более 1 млн га. Лен нашел применение в самых разных сферах народного хозяйства – получение льноволокна для текстильной, медицинской и химической промышленности, производство композитных материалов нового поколения, получение масла из семян масличного льна, которое в зависимости от своего состава применяется в фармацевтической, пищевой и химической промышленности [1].

В настоящее время селекция льна-долгунца в основном направлена на улучшение прядильных свойств льноволокна, что является определяющим фактором в конкурентоспособности данной культуры [2]. Приоритетным направлением в селекции льна масличного является создание сортов, обладающих высокими пищевыми и технологическими качествами масла и его высокой долей в семенах [3].

Необходимым условием при создании новых устойчивых и высокопроизводительных сортов льна является наличие генетического разнообразия исходного материала [4]. Большая часть современных сортов льна получена с помощью традиционных методов селекции, основанных на оценке морфологических признаков растений [5]. Лен характеризуется слабыми межсортовыми различиями, поэтому для селекции новых конкурентоспособных сортов, а также для изучения его генетических особенностей необходимо использование высокоразрешающих молекулярно-генетических методов.

Применение в селекции молекулярных ДНК-маркеров позволяет получить информацию о величине генетического полиморфизма и разрабатывать программы селекционного улучшения важных хозяйственно ценных признаков различных культур. С помощью

молекулярно-генетического маркирования можно оценивать генетически детерминированные особенности сортообразцов, сравнивать их между собой, контролировать направление и сокращать сроки селекционного процесса, отбирать родительские формы для дальнейшей селекции, а также гетерозиготные формы, обладающие необходимой комбинацией признаков [6]. Изучение сортов с привлечением ДНК-маркеров является эффективным средством пребридинговой работы по повышению урожайности и качества [7].

Одним из широко распространенных методов генетического анализа является ISSR-метод, основанный на межмикросателлитном праймировании [8]. По сравнению с другими методами генетического анализа, основанными на ПЦР, для ISSR характерна улучшенная воспроизводимость за счет удлинения и повышения температуры отжига праймера. Довольно часто в ходе исследований выясняется, что некоторые ISSR-праймеры больше подходят для генетического анализа популяций, тогда как другие могут быть полезны для изучения межвидовых взаимосвязей [9].

Исследование генетических ресурсов льна, оценка его генетического разнообразия и выявление скрытой изменчивости дают возможность более целенаправленного подхода к дифференциации и идентификации коллекционных образцов, в том числе и выявлению перспективных генотипов [10].

Цель исследования – изучение особенностей полиморфизма современных сортов льна масличного и льна-долгунца, включенных в Госреестр селекционных достижений России, а также стародавних кряжевых форм с использованием ISSR-маркеров.

Научная новизна работы состоит в углубленном кластерном анализе совокупности сортов льна (*Linum usitatissimum* L.) с использованием результатов ISSR-маркирования, позволившем выявить наличие групп, объединенных по различным признакам: временному периоду

и месту создания сорта, хозяйственно ценным и морфологическим признакам образца.

Материал и методы. Для проведения исследования были отобраны 24 сорта льна масличного и 56 сортов льна-долгунца, различного временного и географического происхождения,

включенных в Государственный реестр селекционных достижений Российской Федерации¹, а также три кряжевых формы льна-долгунца (табл. 1) (кряжевые формы приведены в таблице с каталожными номерами Федерального научного центра лубяных культур).

*Таблица 1 – Исследованные сорта и кряжевые формы льна (L. usitatissimum L.) /
Table 1 – Varieties and local forms of flax (L. usitatissimum L.) studied*

<i>Сорт / Variety</i>		<i>Оригинатор / Originator</i>
<i>1</i>		<i>2</i>
Сорта льна-долгунца / Varieties of fiber flax		
Агата / Agata	Мелина / Melina	Limagrain Nederland BV, г. Лейстад, Нидерланды / Leystad, Holland
Мерилин / Merilin		Van de Bilt Zaden en Vlas BV, г. Слускиль, Нидерланды / Sluiskil (Holland)
Василек / Vasilek	Ласка / Laska	РНДУП «Институт Льна», аг. Устье, Республика Беларусь / RUE “Flax Institute”, ag. Ustye, Republic of Belarus
Веста / Vesta	Левит 1 / Levit 1	
Грант / Grant	Пралеска / Praleska	
А 29	Новоторжский / Novotorzhskij	
А 93	Полет / Polet	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
Александрит / Aleksandrit	Росинка / Rosinka	
Алексим / Aleksim	Славный 82 / Slavnyj-82	
Альфа / Al'fa	Тверской / Tverskoj	
Визит / Vizit	Тверца / Tverca	
Дипломат / Diplomat	Тонус / Tonus	
Зарянка / Zaryanka	Торжокский 4 / Torzhokskij 4	
Лазурный / Lazurnyj	Универсал / Universal	
Ленок / Lenok	Цезарь / Cezar'	
Могилевский 2 / Mogilevskij 2	Сурский / Surskij	
Надежда / Nadezhda		Федеральный научный центр лубяных культур, обособленное подразделение Псковский НИИСХ (ОП Псковский НИИСХ), г. Псков / Federal Research Center for Bast Fiber Crops, separate division of the Pskov Research Institute, Pskov
Антея / Antej	Прибой / Priboj	
Добрыня / Dobrynya	Псковский 359 / Pskovskij 359	
Кром / Krom	Псковский 85 / Pskovskij 85	
Норд / Nord	Русич / Rusich	
Пересвет / Peresvet		Федеральный научный центр лубяных культур, обособленное подразделение Смоленский НИИСХ (ОП Смоленский НИИСХ), г. Смоленск / Federal Research Center for Bast Fiber Crops, separate division of Smolensky NIISH, Smolensk
Импульс / Impul's	Смоленский / Smolenskij	
Лидер / Lider	Смолич / Smolich	
С 108 / S 108	Союз / Soyuz	

Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию. Т. 1. Сорта растений (официальное издание). М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2022. 646 с.

URL: <https://dachanadvoih.ru/wp-content/uploads/2022/11/gosreestr-rus.pdf>

1		2
Белочка / Belochka		Вятская государственная сельскохозяйственная академия (ВСХА), г. Киров / Vyatka State Agrotechnological University, Kirov
Памяти Крепкова / Pamyati Krepkova	Томский 18 / Tomskij 18	Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН (СФНЦА РАН), г. Новосибирск / Siberian Federal Research Center of Agrobiotechnologies RAS, Novosibirsk
Томич / Tomich	Тост 3 / Tost 3	
Томский 16 / Tomskij 16	Тост 4 / Tost 4	
Томский 17 / Tomskij 17	Тост 5 / Tost 5	
Сорта масличного льна / Varieties of oilseed flax		
Рапиол / Raciol		Агрилес, г. Шумперк, Чешская Республика / Sumperk, Czech Republic
Август / Avgust	Радуга / Raduga	Федеральный научный центр Всероссийский научно-исследовательский институт масличных культур имени В. С. Пустовойта (ФНЦ ВНИИМК), г. Краснодар / V. S. Pustovoit All-Russian Research Institute of Oil Crops, Krasnodar
Бирюза / Biryuza	Ручеек / Rucheeck	
ВНИИМК 620 / VNIIMK 620	РФН / RFN	
ВНИИМК 620 ФН / VNIIMK 620 FN	Светлячок / Svetlyachok	
ВНИИМК 630 / VNIIMK 630	Северный / Severnyj	
Даник / Danik	Сокол / Sokol	
Исилькульский / Isil'kul'skij	Флиз / Fliz	
Небесный / Nebesnyj	Ы 117 / Y 117	
Нилин / Nilin		
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
Исток / Istok		Федеральный научный центр лубяных культур, обособленное подразделение Пензенский НИИСХ (ОП Смоленский НИИСХ), г. Пенза / Federal Research Center for Bast Fiber Crops, separate division of Penza NIISH, Penza
Кинельский 2000 / Kinel'skij 2000		Самарский федеральный исследовательский центр РАН (СФИЦ РАН), г. Самара / Samara Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Samara
Илим / Ilim		РНДПП «Институт Льна», аг. Устье, Республика Беларусь / RUE "Flax Institute", ag. Ustye, Republic of Belarus
Чибис / Chibis		Баранник В. А., г. Белгород / Barannik V. A., Belgorod
Уральский / Ural'skij		Федеральный научный центр лубяных культур, обособленное подразделение НИИ льна (ОП НИИЛ), г. Торжок; Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения РАН, г. Екатеринбург / Federal Research Center for Bast Fiber Crops, separate division of the Flax Research Institute, Torzhok; Ural Federal Agricultural Research Center, Ural Branch of the RAS, Yekaterinburg
Кряжевые формы льна-долгунца / Local forms of fiber flax		
Псковский (к-2902) / Pskovskij (k-2902)	Гдовский (к-320) / Gdovskij (k-320)	Псковская область / Pskov region
Зарецкий (к-1980) / Zareckij (k-1980)		

Объединенную геномную ДНК выделяли из листьев четырехнедельных проростков методом экстракции с использованием СТАВ-метода. Пробы ДНК объединяли из 4 растений для каждого сорта. Для ISSR-маркирования

был использован набор из 25 праймеров, показавших хорошие результаты в работах [11, 12]. Их нуклеотидные последовательности представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Нуклеотидные последовательности ISSR-маркеров льна /
Table 2 – Nucleotide sequences of ISSR markers in flax

<i>№</i>	<i>Кодировка / Code</i>	<i>Последовательность / Sequence</i>
1	ISSR-2	CACACACACAGT
2	ISSR-3	AGAGAGAGAGAGAGGT
3	ISSR-4	ACACACACACACACTG
4	ISSR-5	ACACACACACACACCA
5	ISSR-6	AGAGAGAGAGAGAGCA
6	ISSR-9	AGAGAGAGAGAGAGGT
7	ISSR-10	AGAGAGAGAGAGAGGC
8	ISSR-11	GAGAGAGAGAGAGAC
9	ISSR-12	GAGAGAGAGAGAGAA
10	ISSR-13	CACACACACACACAA
11	ISSR-14	ACACACACACACACC
12	ISSR-15	AGAGAGAGAGAGAGCT
13	ISSR-16	AGAGAGAGAGAGAGTT
14	ISSR-18	AGAGAGAGAGAGAGA
15	ISSR-19	AGAGAGAGAGAGAGG
16	ISSR-24	ACCACCACCACCACCG
17	ISSR-26	ACGACGACGACGACGCGG
18	ISSR-28	CACCACCACGC
19	ISSR-31	CTCCTCCTCCTCCTCT
20	ISSR-32	CTGCTGCTGGC
21	ISSR-36	AGCAGCAGCAGCAGCGA
22	ISSR-38	CTCCTCCTCCTCCTCA
23	ISSR-39	GAGCAACAACAACAACAA
24	ISSR-40	AGGAGGAGGAGGAGGTT
25	ISSR-41	GTCACCACCACCACCACCAC

Амплификацию проводили в 25 мкл реакционной смеси следующего состава: 20 нг исследуемой ДНК, необходимое количество праймеров (оптимальные количества определяли экспериментально), 200 мкМ dNTP, 2,5 мкМ MgCl₂ и 1 единицу Taq-полимеразы. ПЦР осуществляли на амплификаторе T100 MyCycler™ (Bio-Rad Laboratories, Inc.). Использовали следующий температурно-временной профиль: первый цикл – 5 мин при 94 °С; последующие 35 циклов при 94 °С – 30 с, отжиг в течение 30 с (температуру подбирали в зависимости от праймеров); элонгация при 72 °С – 30 с; терминальная элонгация – 30 мин при 72 °С. Детекцию ПЦР-продуктов осуществляли методом электрофореза в 1,5%-ном агарозном геле. В качестве буферной системы использовали

1х ТВЕ. Определение длины амплифицированных фрагментов ДНК было выполнено в программе Quantity One в системе гель-документации Gel Doc XR (Bio-Rad, США) с использованием маркера молекулярной массы размером от 50 до 1500 п. н. Построение дендрограммы генетического подобия проводили с помощью программного обеспечения DARwin v. 6 (DARwin software) методом объединения соседей «neighbor joining method» [13].

Результаты и их обсуждение. Результаты ISSR-анализа для масличного льна. На основе ISSR-анализа выбранных сортов льна масличного был выполнен кластерный анализ и построена дендрограмма генетического подобия, которая представлена на рисунке 1.

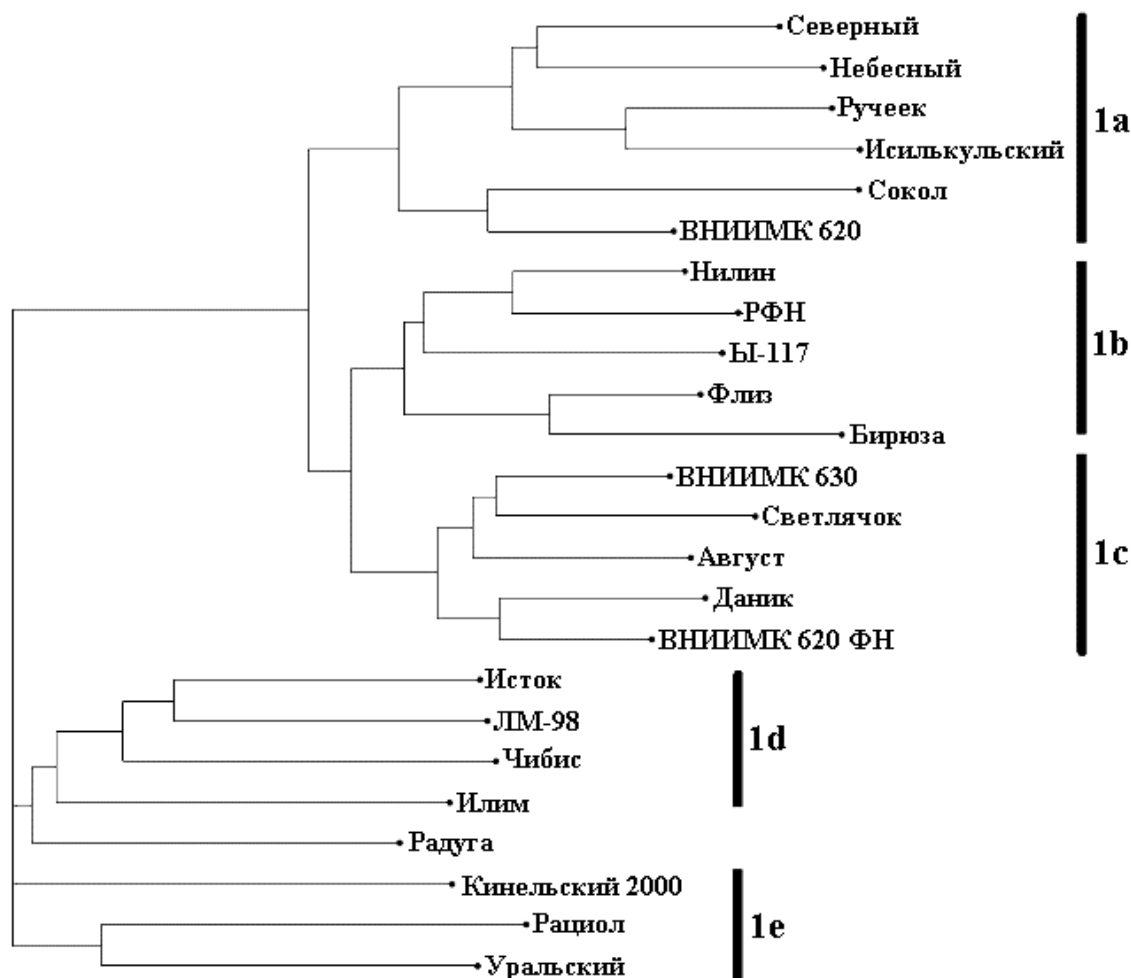


Рис. 1. Дендрограмма генетического подобия сортов льна масличного по данным ISSR-анализа /
Fig. 1. The dendrogram of genetic similarity of linseed varieties according to ISSR analysis

Анализ разделил сорта масличного льна на пять кластеров.

Первые три кластера (1a, 1b, 1c) составляют одну большую группу сортов селекции ВНИИМК. Группа 1a содержит высокомасличные сорта с содержанием масла 48-49 %, выведенные селекционерами ВНИИМК преимущественно в 90-х годах прошлого века [14]. Группа 1b объединила образцы с содержанием масла 40-46 % [15], группа 1c представлена образцами с наибольшим содержанием масла – 50-53 % [14, 15]. Данные могут отражать и другие направления селекционной деятельности оригинатора ВНИИМК, например, по урожайности и устойчивости к неблагоприятным факторам среды.

Вторая большая группа состоит из двух кластеров 1d и 1e и представлена сортами других селекционных учреждений, различного географического происхождения. Образцы этих кластеров обладают схожими показателями по масличности (40-44 %) [14].

Результаты ISSR-анализа для льна-долгунца и кряжевых форм. По результатам

исследования выбранных сортов льна-долгунца и кряжевых форм также был выполнен кластерный анализ и построена дендрограмма генетического подобия, представленная на рисунке 2.

Дендрограмма генетического подобия сортов льна-долгунца и кряжевых форм выявляет 12 подкластеров 2a-2l, разделенных на три неравномерные группы. Практически каждый подкластер имеет свою характерную особенность, не связанную с географией происхождения.

Первая группа формируется подкластерами 2a-2b. В подкластер 2a вошли кряжи Зарецкий, Гдовский и Псковский. Подкластер 2b сформирован из сортов торжокской, смоленской и псковской селекции периода 1981-1987 гг. Данную группу можно охарактеризовать как старые сортообразцы.

Вторая группа состоит из подкластеров 2c-2g. В ней прослеживается связь с основными направлениями селекционной работы с культурой льна-долгунца в 60-90-х годах прошлого века, такими как увеличение содержания волокна в стебле и повышение урожайности льносемян.

Несколько обособленно в эту группу вошел подкластер 2с, который состоит из высоковолокнистых сортов 1969-1987 гг., авторство которых также, как и в подкластере 2b, принадлежит трем старейшим селекционным центрам. Можно предположить, что эти сорта и их комбинации стали селекционной основой сортов данной группы. В подкластеры 2d-2е вошли

среднеспелые сорта с высоким содержанием волокна (30-33 %) при средней урожайности льносемян [16]. Подкластер 2f составили раннеспелые сорта селекции СФНЦА РАН с содержанием волокна до 35 % [17], подкластер 2g – среднеспелые высоковолокнистые (до 32 % волокна) образцы селекции НИИЛ с рекордной урожайностью семян [18].

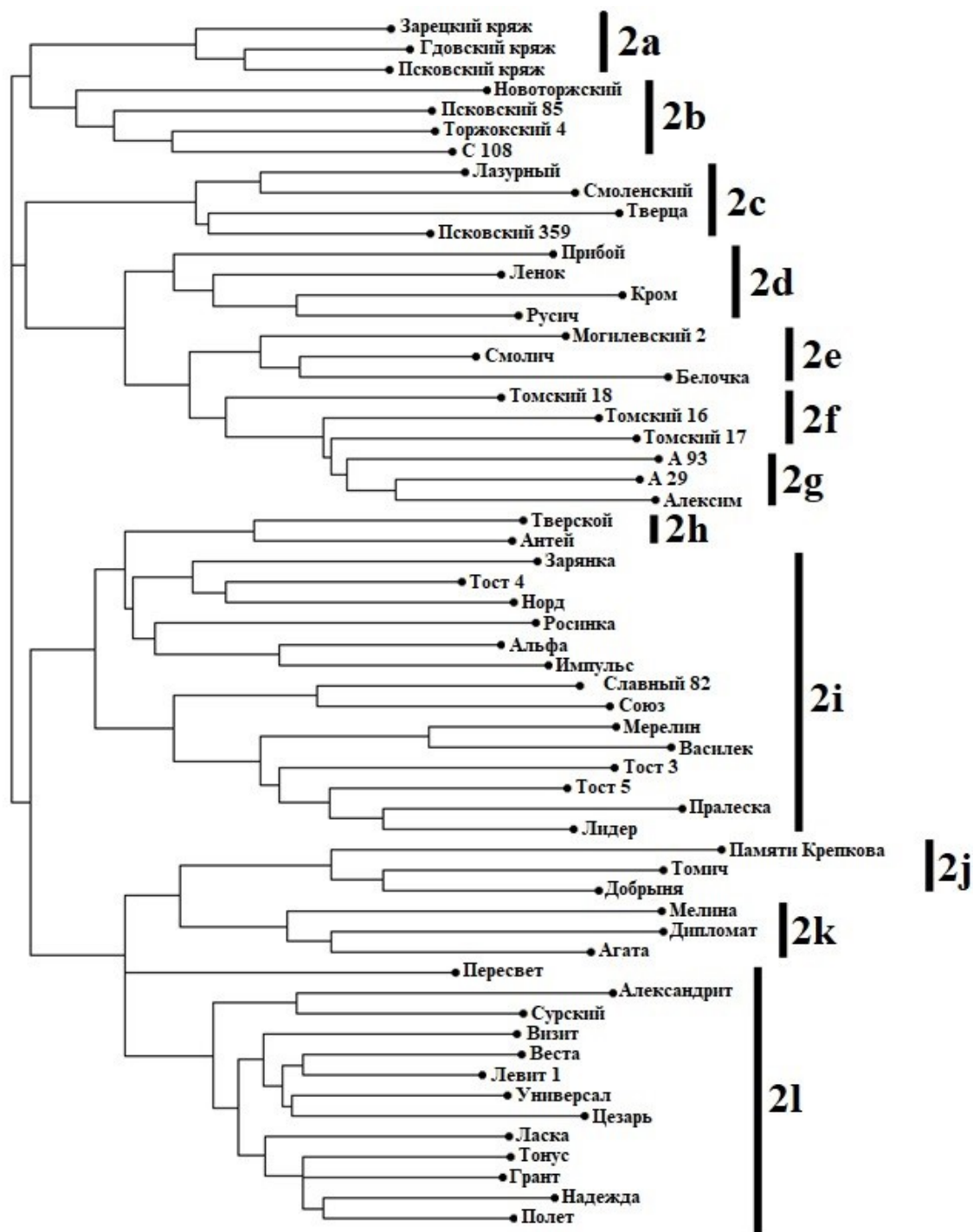


Рис. 2. Дендрограмма генетического подобия сортов льна-долгунца и кражевых форм по данным ISSR-анализа /

Fig. 2. The dendrogram of genetic similarity of fiber flax and local forms varieties according to ISSR analysis

Третья, самая большая группа, выбрала в себя подкластеры 2h-2l и характеризует основные направления селекции начала 21 века – активное использование зарубежного материала и повышение устойчивости к стрессовым факторам среды. Подкластеры 2h и 2i объединяют высоковолокнистые сорта отечественного и зарубежного происхождения с большим разбросом по продолжительности вегетационного периода. Кроме параметра высокого содержания волокна (около 30 %), других общих фенотипических признаков для данной группы пока не обнаружено [16, 18, 19]. Подавляющее количество образцов, входящих в группы 2j, 2k и 2l, обладают хорошей комплексной устойчивостью к болезням: фузариозу, ржавчине, антракнозу, а также полеганию и засухе. Представляет интерес анализ сортов в соответствии с продолжительностью вегетационного периода:

2j – раннеспелые селекции СФНЦА РАН и Псковского НИИСХ; 2k – позднеспелые, происходящие от зарубежного сорта Viking; 2l – среднеспелые отечественной и зарубежной селекции, в основном НИИЛ и белорусского Института льна [20].

Выводы. Оценка современных сортов льна и его крахмальных стародавних форм с использованием ISSR-маркеров позволила выявить связи на молекулярном уровне и определить группы генотипов, объединенных общностью ряда хозяйственных признаков. Полученные данные позволяют начать формирование методических подходов для связи фенотипических и хозяйственных признаков льна с молекулярными маркерами. С помощью ISSR-анализа появляется возможность ускорения селекционного процесса создания конкурентоспособных сортов.

Список литературы

1. Пороховинова Е. А., Шеленга Т. В., Матвеева Т. В., Павлов А. В., Григорьева Е. А., Брач Н. Б. Полиморфизм генов, контролирующих низкое содержание линоленовой кислоты, у линий генетической коллекции льна ВИР. Экологическая генетика. 2019;17(2):5-19. DOI: <https://doi.org/10.17816/ecogen1725-19> EDN: JVWBDG
2. Понажев В. П., Виноградова Е. Г. Развитие селекции и семеноводства льна-долгунца – важнейший ресурс повышения эффективности льноводства России. Технические культуры. Научный сельскохозяйственный журнал. 2022;1(2):30-39. DOI: <https://doi.org/10.54016/SVITOK.2022.71.55.004>
3. Брач Н. Б., Пороховинова Е. А., Шеленга Т. В. Инновационные возможности селекции масличного льна, ориентированной на различный состав масла. Достижения науки и техники АПК. 2016;30(6):5-8. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26591631> EDN: WJXNIJ
4. Clunier-Ross T. Mangolds, manure and mixtures: the importance of crop diversity on British farms. The Ecologist. 1995;25(5):181-187.
5. Ушаповский И. В., Лемеш В. А., Богданова М. В., Гузенко Е. В. Особенности селекции и перспективы применения молекулярно-генетических методов в генетико-селекционных исследованиях льна (*Linum usitatissimum* L.). Сельскохозяйственная биология. 2016;51(5):602-616. DOI: <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2016.5.602rus> EDN: WZJQDT
6. Hoque A., Fiedler J. D., Rahman M. Genetic diversity analysis of a flax (*Linum usitatissimum* L.) global collection. BMC genomics. 2020;21(1):557. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12864-020-06922-2>
7. Pan G., Chen A., Li J., Huang S., Tang H., Chang L., Zhao L., Li D. Genome-wide development of simple sequence repeats database for flax (*Linum usitatissimum* L.) and its use for genetic diversity assessment. Genetic Resources and Crop Evolution. 2020;67:865-874. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10722-020-00882-y>
8. Бобошина И. В., Боронникова С. В. Изучение генетического полиморфизма некоторых сортов *Triticum aestivum* L. с использованием ISSR-маркеров. Аграрный вестник Урала. 2012;(5):19-20. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17840238> EDN: PAKIVZ
9. Костюкова Е. Е., Заякин В. В., Нам И. Я. Молекулярно-генетический анализ редких видов орхидных Брянской области. Бюллетень Брянского отделения Русского ботанического общества. 2013;(1(1)):51-55. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20295855> EDN: RCDMOB
10. Рожмина Т. А., Рыжов А. И., Куземкин И. А., Киселева Т. С. Внутривидовое разнообразие льна культурного (*Linum usitatissimum* L.) и его роль в решении проблемы сырьевого обеспечения страны. Достижения науки и техники АПК. 2017;31(12):17-20. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32301742> EDN: YMEMUF
11. Kojoma M., Iida O., Makino Y., Sekita S., Satake M. DNA fingerprinting of *Cannabis sativa* using inter-simple sequence repeat (ISSR) amplification. Planta Medica. 2002;68(1):60-63. DOI: <https://doi.org/10.1055/s-2002-19875>
12. Zhang L. G., Chang Y., Zhang X. F., Guan F. Z., Yuan H. M., Yu Y., Zhao L. J. Analysis of the genetic diversity of Chinese native *Cannabis sativa* cultivars by using ISSR and chromosome markers. Genetic and Molecular Research. 2014;13(4):10490-10500. DOI: <https://doi.org/10.4238/2014.December.12.10>
13. 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>
14. Лучкина Т. Н., Лучкин Н. С., Картамышева Е. В., Горбаченко Ф. И. Лен масличный – динамично растущая культура в России. Генетика и селекция на Дону. Ростов-на-Дону: Южный федеральный университет, 2015. Вып. 4. С. 131-139. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_23468992_26832101.pdf

15. Першаков А. Ю., Белкина Р. И., Сулейменова А. К., Пороховинова Е. А. Коллекционные образцы льна масличного в условиях Северного Зауралья. Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2022;(6):58-63. DOI: <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2022-98-6-58-63> EDN: OQWCAA
16. Штабель Ю. П., Попеляева Н. Н. Агроэкологическая оценка сортов льна-долгунца. Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2013;(1(99)):054-056.
Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18801875> EDN: PVLMDJ
17. 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, 2021. С. 44-49. DOI: <https://doi.org/10.25230/conf11-2021-44-49> EDN: OEBVST
18. Кудряшова Т. А., Виноградова Т. А., Козьякова Н. Н. Нормативы перевода в волокно льнотресты сортов льна долгунца селекции ВНИИ льна. Научное обеспечение производства прядильных культур: состояние, проблемы и перспективы: сб. научн. тр. Тверь: ТГУ, 2018. С. 258-261.
19. Ушаповский И. В., Васильев А. С., Щеголихина Т. А., Федоренко В. Ф., Мишуров Н. П., Голубев И. Г. Анализ состояния и перспективные направления развития селекции и семеноводства технических культур: научный аналитический обзор. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2019. 72 с.
Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42348451> EDN: HYNOPB
20. Гриб С. И., Богдан В. З. Оптимизация методологии и результаты селекции льна-долгунца в Беларуси. Таврический вестник аграрной науки. 2023;(1(33)):6-18. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.7896477> EDN: QMWGIE

References

1. Porokhovinova E. A., Shelenga T. V., Matveeva T. V., Pavlov A. V., Grigorieva E. A., Brutch N. B. Polymorphism of genes controlling low level of linolenic acid in lines from VIR flax genetic collection. *Ekologicheskaya genetika* = Ecological genetics. 2019;17(2):5-19. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17816/ecogen1725-19>
2. Ponazhev V. P., Vinogradova E. G. The development of selection and seed production of flax is the most important resource for improving the efficiency of flax growing in Russia. *Tekhnicheskie kul'tury. Nauchnyy sel'skokhozyaystvennyy zhurnal* = Technical crops Scientific agricultural journal. 2022;(1(2)):30-39. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.54016/SVITOK.2022.71.55.004>
3. Brutch N. B., Porokhovinova E. A., Shelenga T. V. Innovative possibilities of oil flax breeding orientated at the different oil composition. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK* = Achievements of Science and Technology of AICis. 2016;30(6):5-8. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26591631>
4. Clunier-Ross T. Mangolds, manure and mixtures: the importance of crop diversity on British farms. *The Ecologist*. 1995;25(5):181-187.
5. Ushchapovskii I. V., Lemesh V. A., Bogdanova M. V., Guzenko E. V. Particularity of breeding and perspectives on the use of molecular genetic methods in flax (*Linum usitatissimum* L.) genetics and breeding research. *Sel'skokhozyaystvennaya biologiya* = Agricultural Biology. 2016;51(5):602-616. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2016.5.602rus>
6. Hoque A., Fiedler J. D., Rahman M. Genetic diversity analysis of a flax (*Linum usitatissimum* L.) global collection. *BMC genomics*. 2020;21(1):557. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12864-020-06922-2>
7. Pan G., Chen A., Li J., Huang S., Tang H., Chang L., Zhao L., Li D. Genome-wide development of simple sequence repeats database for flax (*Linum usitatissimum* L.) and its use for genetic diversity assessment. *Genetic Resources and Crop Evolution*. 2020;67:865-874. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10722-020-00882-y>
8. Boboshina I. V., Boronnikova S. V. Studying of genetic polymorphism of some grades *Triticum aestivum* L. with use of ISSR-markers. *Agrarnyy vestnik Urala* = Agrarian Bulletin of the Urals. 2012;(5):19-20. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17840238>
9. Kostyukova E. E., Zayakin V. V., Nam I. Ya. The molecular-genetic identification of rare orchid species of the Bryansk region. *Byulleten' Bryanskogo otdeleniya Russkogo botanicheskogo obshchestva* = Bulletin of Bryansk Department of Russian botanical society. 2013;(1(1)):51-55. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20295855>
10. Rozhmina T. A., Ryzhov A. I., Kuzemkin I. A., Kiseleva T. S. Intraspecific variety of *Linum usitatissimum* L. and its role in the decision of a problem of raw maintenance of the country. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK* = Achievements of Science and Technology of AICis. 2017;31(12):17-20. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32301742>
11. Kojoma M., Iida O., Makino Y., Sekita S., Satake M. DNA fingerprinting of *Cannabis sativa* using inter-simple sequence repeat (ISSR) amplification. *Planta Medica*. 2002;68(1):60-63. DOI: <https://doi.org/10.1055/s-2002-19875>
12. Zhang L. G., Chang Y., Zhang X. F., Guan F. Z., Yuan H. M., Yu Y., Zhao L. J. Analysis of the genetic diversity of Chinese native *Cannabis sativa* cultivars by using ISSR and chromosome markers. *Genetic and Molecular Research*. 2014;13(4):10490-10500. DOI: <https://doi.org/10.4238/2014.December.12.10>
13. 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>
14. Luchkina T. N., Luchkin N. S., Kartamysheva E. V., Gorbachenko F. I. Oilseed flax is a dynamically growing crop in Russia. Genetics and breeding on the Don. Rostov-na-Donu: *Yuzhnyy federal'nyy universitet*, 2015. Iss. 4. pp. 131-139. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_23468992_26832101.pdf
15. Pershakov A. Yu., Belkina R. I., Suleymenova A. K., Porokhovinova E. A. Collectible samples of oil flax in the conditions of the Northern Trans-urals. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Izvestia Orenburg State Agrarian University. 2022;(6):58-63. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2022-98-6-58-63>

16. Shtabel Yu. P., Popelyaeva N. N. Agro-ecological evaluation of fiber flax varieties. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Bulletin of Altai State Agricultural University. 2013;(1(99)):054-056. (In Russ.).

URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18801875>

17. Gorbova M. A., Mansapova A. I. The study of fiber flax varieties bred in the Tomsk region 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*, 2021. pp. 44-49. DOI: <https://doi.org/10.25230/conf11-2021-44-49>

18. Kudryashova T. A., Vinogradova T. A., Kozyakova N. N. Standards for the conversion of flax fiber to flax varieties of fiber flax bred by the Flax Research Institute. Scientific support for the production of spinning crops: state, problems and prospects: collection of scientific papers. Tver: TGU, 2018. pp. 258-261.

19. Ushchapovsky I. V., Vasiliev A. S., Schegolikhina T. A., Fedorenko V. F., Mishurov N. P., Golubev I. G. Analysis of the state of breeding and seed production of industrial crops and their promising areas of development: scientific and analytic overview. Moscow: *FGBNU «Rosinformagrotekh»*, 2019. 72 p.

URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42348451>

20. Grib S. I., Bogdan V. Z. Optimization of the methodology and results of flax breeding in Belarus. *Tavricheskiy vestnik agrarnoy nauki* = Taurida herald of the agrarian sciences. 2023;(1(33)):6-18. (In Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.7896477>

Сведения об авторах

✉ **Базанов Тарас Александрович**, кандидат хим. наук, заведующий лаборатории 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>

Логинова 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>

Смирнова 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>

Михайлова 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 research 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 research 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 research 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. Smirnova, postgraduate, junior researcher, the Laboratory of the molecular-genetic research 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. Mikhaylova, junior researcher, the Laboratory of the molecular-genetic research 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

Результаты и перспективы селекции люпина узколистного сидерального типа использования по продуктивности и морфо-биологическим признакам

© 2023. П. А. Агеева✉, Н. А. Почутина, Н. В. Мисникова

Всероссийский научно-исследовательский институт люпина – филиал
ФГБНУ «Федеральный научный центр кормопроизводства и агроэкологии
имени В. Р. Вильямса», Брянская обл., Российская Федерация

Люпин узколистный (*Lupinus angustifolius* L.) издавна использовался в качестве сидеральной культуры. Алкалоидность, несовместимая с кормовыми сортами, для сидеральных сортов является желательным признаком. Алкалоиды, содержащиеся в запахиваемой биомассе сидерального люпина, оказывают обеззараживающее воздействие на почву, вследствие этого уменьшается поражение последующих культур. Нетребовательность сидерального люпина к условиям произрастания складывается из нескольких особенностей: он является энергичным азотфиксатором и обеспечивает себя азотом на 70 %, а глубоко проникающая корневая система позволяет возмещать недостаток питательных веществ в пахотном слое. Цель исследований – выявить перспективные сорта и сортообразцы люпина узколистного сидерального типа использования по урожайности зерна и зелёной массы, продолжительности вегетационного периода, алкалоидности и другим морфо-биологическим показателям. Исследования проведены в условиях Брянской области (юго-западная зона Центрального региона России) на дерново-подзолистых суглинистых окультуренных почвах со средним уровнем плодородия. Материалом для исследований служили 7 сидеральных сортов и сортообразцов люпина узколистного, которые изучали в конкурсном сортоиспытании 2021-2022 гг. По урожайности зерна (2,62 т/га), зелёной массы (31,9 т/га) и скороспелости (84 дня) выделился сортообразец Сидерат 265-19. Содержание алкалоидов в его семенах составило 1,003 %, на уровне стандарта. В работе представлены результаты структурного анализа по морфологическим особенностям и элементам продуктивности 4 новых сидеральных гибридных номеров (контроль – сорт Щучинский). По высоте растений (96,4 см) лучший показатель получен по № 1764 (Сидерат 46 х Кормовой 344). По зерновой продуктивности выделился № 1749 (Сидерат 46 х Брянский сидерат): масса семян с растения составила 14,3 г, обсеменённость боба – 5,2 штук семян.

Ключевые слова: *Lupinus angustifolius* L., сидерат, урожайность, алкалоидность, сорт, сортообразец, гибрид, структурный анализ, зерновая продуктивность

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ Федерального научного центра «ВИК им. В. Р. Вильямса» (тема № FGGW-2022-0003).

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Агеева П. А., Почутина Н. А., Мисникова Н. В. Результаты и перспективы селекции люпина узколистного сидерального типа использования по продуктивности и морфо-биологическим признакам. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2023;24(5):777-784. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.5.777-784>

Поступила: 13.07.2023

Принята к публикации: 06.10.2023

Опубликована онлайн: 30.10.2023

The results and perspectives for breeding of the green manure narrow-leaved lupine varieties for the productivity and morph-and-biological characters

© 2023. Praskovya A. Ageeva✉, Natalia A. Potchutina, Nadezhda V. Misnikova

All-Russian Lupine Scientific Research Institute – branch of the Federal Williams
Research Center of Forage Production & Agroecology, Bryansk region, Russian Federation

The narrow-leaved lupine (*Lupinus angustifolius* L.) has long been used as a green manure crop. Alkaloid content which is incompatible with forage varieties is a desirable trait for green manure ones. Alkaloids presented in plowed biomass of the green manure lupine have disinfected action for soil resulted in the lower infection of the next crops. The undemanding nature of green manure lupine to growing conditions consists of several features: it is an active nitrogen accumulator and provides 70 % of nitrogen for own needs, and its deeply penetrated root system allows make up the deficit of nutritional substances in arable layer with use of sub-soil horizons. The aim of the study was to reveal perspective narrow-leaved lupine's green manure varieties and breeding lines for grain and green mass yield, for length of the vegetation season, alkaloid content and other morphological and biological characters. The tests have been done under Bryansk region's conditions (the South-West zone of the Central region of Russia) on soddy-podzolic loamy cultivated soils with the moderate fertility level. The objects of the research were seven green manure varieties and breeding lines of the narrow-leaved lupine which have been tested in competition tests of 2021-2022. The breeding line Siderat 265-19 stand out for grain (2.62 t/ha), green mass (31.9 t/ha) yield and for early maturing (84 days). Alkaloid content in its seeds made 1.003 %, the standard level. The article presents the results of structural analyses for morphological peculiarities and productivity elements of new green manure hybrid lines (the standard

variety – Tshutchinskiy). The No. 1764 (Siderat 46 x Kormovoy 344) had the best index for plant height. The No. 1749 (Siderat 46 x Bryanskiy siderat) picked out for grain productivity. The seed weight per a plant was 14.3 g and the pod's seedling was 5.2 seeds.

Keywords: *Lupinus angustifolius* L., green manure, yield, alkaloid content, variety, accession, hybrid, structure analysis, grain productivity

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 Williams Research Center of Forage Production & Agroecology (Theme No. FGGW-2022-0003).

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: Ageeva P. A., Potchutina N. A., Misnikova N. V. The results and perspectives for the breeding of the green manure narrow-leaved lupine varieties for the productivity and morph-and-biological characters. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2023;24(5):777-784. (In Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.5.777-784>

Received: 13.07.2023

Accepted for publication: 06.10.2023

Published online: 30.10.2023

Люпин узколистный (*Lupinus angustifolius* L.) издавна использовался в качестве сидеральной культуры, так как способен развиваться на самых бедных почвах. Алкалоидность, несовместимая с кормовыми сортами, для сидеральных сортов является желательным признаком. Д. Н. Прянишников, рассматривая роль зелёного удобрения в восстановлении плодородия почвы, писал «...там, где для улучшения почв особенно необходимо обогащение их органическим веществом, а навоза по той или иной причине не хватает, зелёное удобрение приобретает особенно большое значение» [1, с. 346]. Нетребовательность его к условиям произрастания складывается из нескольких особенностей: он является энергичным азотфиксатором и обеспечивает себя азотом на 70 %, а глубоко идущая корневая система позволяет возмещать недостаток питательных веществ в пахотном слое использованием подпочвенных горизонтов [2, 3]. Помимо глубины распространения, корневая система люпина может заимствовать фосфор из труднорастворимых соединений. Для культуры, следующей за люпином, почва в результате обогащается не только азотом, но и фосфором.

Среди однолетних зернобобовых культур люпин обладает наивысшей азотфиксирующей способностью. При нормальном развитии растений посевы сидерального люпина оставляют после себя 160...180 кг атмосферного азота, а при инокуляции семян эффективными штаммами клубеньковых бактерий и при благоприятных почвенно-климатических условиях – до 400 кг/га, что соответствует 0,5...1,0 т аммиачной селитры [4].

Глубоко проникающая корневая система перекачивает минеральные соединения из подпахотного в пахотный слой, делая их доступными для последующих культур. Она разрыхляет и структурирует почву, улучшая водный

режим и физическое состояние почвы: повышается влагоёмкость и содержание водопрочных агрегатов, уменьшается уплотнённость пахотного и подпахотного горизонтов за счёт биодренажа корневой системой, что определяет формирование водного и питательного режимов.

Люпин при запашке обогащает почву большим количеством органического вещества. Средний урожай зелёной массы составляет 30-40 т/га, а в благоприятных условиях может достигать до 50-60 т/га. Установлено, что на один центнер сухого вещества надземного урожая люпина приходится столько же корней. Биомасса люпина – это обогащённый азотом субстрат, и разлагается она очень быстро с образованием большого количества активного «лабильного» гумуса, который является показателем эффективного плодородия почвы.

Зеленая масса люпина, запаханная на удобрение, стимулирует увеличение численности полезных почвенных микроорганизмов, улучшает их популяционный состав и повышает биологическую активность почвы. Зеленое удобрение является средством борьбы с почвоутомлением в севооборотах с высоким удельным весом зерновых культур [1, 3]. Тонна запаханной в почву биомассы сидерального люпина по эффективности эквивалентна навозу, внесённому в той же дозе¹. Алкалоиды, содержащиеся в запахиваемой биомассе сидерального люпина, оказывают обеззараживающее воздействие на почву. Вследствие этого уменьшается поражение последующих культур: зерновых – корневыми гнилями, картофеля – паршой обыкновенной и порошистой, ризоктонией и картофельной нематодой [2]. При минерализации биомассы люпина усиливается дыхание почвы, увеличивается количество полезной почвенной микробиоты, создаются предпосылки для лучшей

¹Возделывание и использование кормового узколистного люпина: практические рекомендации. Под ред. д-ра с.-х. наук И. П. Такунова. Брянск, 2001. 54 с.

обеспеченности элементами питания последующих культур. В прямом действии прибавка от люпиновой сидерации составляет на озимой ржи 0,49-0,52 т/га, озимой пшенице – 0,89-0,94 т/га, ячмене – 0,6 т/га [4, 5].

Ценность люпина, как органического удобрения, заключается в том, что затраты ограничиваются расходом семян на посев и запашку зеленой массы, а это в несколько раз ниже затрат на вывозку и внесение навоза, торфа и компоста. Для использования люпина в качестве органического удобрения нужны надежные сидеральные сорта [6, 7, 8]. Для стабильной реализации продуктивного потенциала новые сорта люпина должны обладать широким диапазоном реакции на изменяющиеся экологические факторы. Причём по мере ухудшения почвенно-климатических условий значение экологической устойчивости должно возрастать [9, 10, 11]. В современном сельскохозяйственном производстве при преобладании в посевах короткоротационных севооборотов зернового типа использование сидерального люпина актуально.

Цель исследований – выявить в условиях Брянской области перспективные сорта, сортообразцы и гибриды люпина узколистного сидерального типа использования по урожайности зерна и зелёной массы, продолжительности вегетационного периода, алкалоидности и другим морфо-биологическим показателям для использования в дальнейшей селекции.

Новизна исследований – агробиологическая оценка сортов, новых сортообразцов и гибридов люпина узколистного сидерального типа использования по комплексу полезных хозяйственно-биологических признаков в условиях изменяющегося в сторону потепления климата.

Материал и методы. Исследования проведены на базе Всероссийского НИИ люпина (Брянская область, юго-западная зона Центрального региона России) на дерново-подзолистых суглинистых окультуренных почвах со средним уровнем плодородия (содержание гумуса по Тюрину 2,0-2,5 %, подвижного фосфора 160-180 мг/кг, обменного калия 140-170 мг/кг почвы; $pH_{\text{сол.}}$ 5,0-5,5).

Материалом для исследований служили 5 сортов люпина узколистного, включённых, кроме сорта Азуро, в Государственный реестр селекционных достижений РФ и 2 новых сортообразца селекции ВНИИ люпина, которые изучались в конкурсном сортоиспытании 2021-2022 гг.

В качестве стандарта взят сорт Сидерат 46, районированный в 2015 году во всех регионах Российской Федерации. Сорт относится к скороспелому биотипу, устойчив к полеганию, растрескиванию бобов и осыпанию семян на корню. Потенциальная урожайность зерна сорта достигает 5,0 т/га.

Все изучаемые в опыте сорта и сортообразцы люпина узколистного относятся к ветвистым индетерминантным формам с разной степенью блокировки бокового ветвления.

В 2022 году изучали новый исходный материал, представленный четырьмя алкалоидными гибридными комбинациями. За контроль взят белорусский сорт Щучинский.

Закладку опытов, визуальные наблюдения и учёт² проводили по общепринятым в селекционной работе методикам³. Количественное содержание алкалоидов в зерне и зеленой массе люпина определяли в соответствии с методическими рекомендациями Всероссийского НИИ люпина⁴.

В научно-исследовательской работе использовали технологию возделывания люпина узколистного, разработанную во Всероссийском НИИ люпина⁵. Продолжительность вегетационного периода определена от фазы «всходы» до фазы «созревание».

Погодные условия в годы проведения опыта были разными. В 2021 году в фазу цветения прошёл ураган, который сильно уплотнил почву и повредил растения. Условия для азотфиксации были крайне неблагоприятными, что отрицательно отразилось на урожайности люпина. Период созревания люпина узколистного (третья декада июля - первая декада августа) был засушливым. Гидротермический коэффициент (ГТК) в этот промежуток варьировал в диапазоне 0,43...0,82. Под влиянием повышенных температур и недостатка влаги растения люпина сбрасывали листву и усыхали.

²Степанова С., Назарова Н., Корнейчук В., Леман Хр., Миколайчик Я. Широкий унифицированный классификатор СЭВ и Международный классификатор СЭВ рода *Lupinus*. Л. Л.: ВИР, 1983. 39 с.

³Методика Государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. М., 1985. 269 с.

⁴Артюхов А. И., Ягovenko Т. В., Афонина Е. В., Трошина Л. В. Количественное определение алкалоидов: методические рекомендации. Брянск, 2012. 15 с.

⁵Такунов И. П., Слесарева Т. Н., Лукашевич М. И. и др. Инновационный опыт производства кормового люпина. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2012. 77 с.

Вегетационный период 2022 года был более благоприятным для роста и развития растений люпина. Нормальный режим увлажнения во второй и третьей декадах июня способствовал дружному и обильному цветению и хорошему завязыванию бобов. Водно-тепловой режим июля соответствовал средней многолетней норме. Гидротермический коэффициент составил 1,52 единицы. Достоверность результатов исследований по оценке сортов узколистного люпина в конкурсном сортоиспытании проведена методом дисперсионного анализа по Б. А. Доспехову⁶.

Результаты и их обсуждение. В опыте изучали сорта (Сидерат 38, Брянский сидерат и Сидерат 46) и новые сортообразцы (Сидерат 265-19, Сидерат 412) люпина узколистного сидерального типа использования, созданные

во Всероссийском НИИ люпина, а также сорт Азуро (африканский дикарь) и Орловский сидерат (ВНИИ зернобобовых и крупяных культур).

Одним из основных показателей эффективности выращивания люпина является урожайность зерна, которая за годы исследований по сортам и сортообразцам варьировала от 1,12 до 3,14 т/га (табл. 1). Наибольшая нестабильность по этому показателю выявлена по африканскому сорту Азуро, что свидетельствует о его слабой адаптивности [12]. Достоверная прибавка урожая зерна к стандарту получена у сортообразца Сидерат 265-19 (0,34 т/га, или 15 %), у сорта Сидерат 38 – 0,23 т/га. Важно то, что эти варианты по годам исследований или не уступили по урожайности зерна стандарту, или превышали его на 17-22 % [13, 14].

Таблица 1 – Урожайность зерна сортов люпина узколистного сидерального типа использования, т/га (2021-2022 гг.) /

Table 1 – Grain yield of the narrow-leaved lupine varieties used as green manure, t/ha (2021-2022)

Сорт, сортообразец / Variety, accession	2021 г.	2022 г.	Среднее / Average	± к стандарту / ± to standard
Сидерат 46, стандарт / Siderat 46, Standard	1,88	2,69	2,28	-
Сидерат 265-19 / Siderat 265-19	2,29	2,95	2,62	0,34
Сидерат 412 / Siderat 412	1,75	2,46	2,10	-0,18
Брянский сидерат / Bryanskiy siderat	1,68	2,64	2,16	-0,12
Сидерат 38 / Siderat 38	1,88	3,14	2,51	0,23
Азуро / Azuro	1,12	2,13	1,62	-0,66
Орловский сидерат / Orlovskiy siderat	1,48	2,44	1,96	-0,32
HCP ₀₅ / LSD ₀₅	0,18	0,23	-	-

Технологическая спелость сидерального люпина на запарку зелёной массы наступает в период перехода от фазы «сизый боб» к фазе «блестящий боб» на центральной кисти растений. В это время растения ещё сохраняют листовую поверхность и имеют хорошо сформированные бобы. Продолжительность периода «всходы-блестящий боб» по вариантам составляет 55-60 дней. Урожайность зелёной массы изучаемых сортов и сортообразцов, представленных в таблице 2, варьировала по годам проведения опыта от 20,8 до 42,7 т/га. Максимальная урожайность получена по сорту Азуро в 2022 году. Минимальный показатель в предыдущем году получен также по этому сорту. Средняя урожайность зелёной массы стандарта Сидерат 46 составила 30,9 т/га. Этот показатель незначительно менялся по годам изучения. Сортообразец Сидерат 265-19 по урожайности зелёной массы имеет небольшое превышение к стандарту.

В селекционной работе по созданию сортов узколистного люпина сидерального типа использования одним из важных направлений является повышение уровня алкалоидности зерна и зелёной массы. Этот показатель на ранних этапах селекции постоянно контролируется качественными методами определения алкалоидов по вегетирующим растениям и семенам. В конкурсном сортоиспытании определяется количественное содержание алкалоидов в продукции. В группу сидеральных⁷ входят сорта с содержанием алкалоидов в семенах более 0,399 %. Высокой алкалоидностью семян (более 1 %), наряду со стандартом, выделился сортообразец Сидерат 265-19 (табл. 3). Алкалоидность сухого вещества зелёной массы варьировала в диапазоне 0,159-0,585 %. Максимальными показателями выделились сортообразец Сидерат 265-19 и сорт Сидерат 38.

⁶Доспехов Б. А. Методика полевого опыта. М.: Колос, 1985. 263 с.

⁷Степанова С., Назарова Н., Корнейчук В., Леман Хр., Миколайчик Я. Указ. соч.

Таблица 2 – Урожайность зелёной массы сидеральных сортов люпина узколистного, т/га (2021-2022 гг.) /
Table 2 – The green mass yield of the narrow-leaved lupine varieties used as green manure, t/ha (2021-2022)

<i>Сорт, сортообразец /</i> <i>Variety, accession</i>	<i>2021 г.</i>	<i>2022 г.</i>	<i>Среднее /</i> <i>Average</i>	<i>± к стандарту /</i> <i>± to standard</i>
Сидерат 46, стандарт / Siderat 46, Standard	31,8	30,0	30,9	-
Сидерат 265-19 / Siderat 265-19	32,6	31,2	31,9	1,0
Сидерат 412 / Siderat 412	25,2	28,7	27,0	-3,9
Брянский сидерат / Bryanskiy siderat	21,8	23,3	22,6	-8,3
Сидерат 38 / Siderat 38	27,6	25,2	26,4	-4,5
Азуро / Azuro	20,8	42,7	31,8	0,9
Орловский сидерат / Orlovskiy siderat	20,8	29,5	25,2	-5,7

Таблица 3 – Хозяйственно-биологическая характеристика сидеральных сортов люпина узколистного (2021-2022 гг.) /
Table 3 – Economic-biological characteristics of the narrow-leaved lupine varieties used as green manure (2021-2022)

<i>Сорт, сортообразец /</i> <i>Variety, accession</i>	<i>Алкалоидность, % /</i> <i>Alkaloid content, %</i>		<i>Вегетационный период, дни /</i> <i>Vegetation season, days</i>	<i>Высота растений, см /</i> <i>Plant height, cm</i>
	<i>зерно /</i> <i>grain</i>	<i>зеленая масса /</i> <i>green mass</i>		
Сидерат 46, стандарт / Siderat 46, Standard	1,016	0,519	81	48,4
Сидерат 265-19 / Siderat 265-19	1,003	0,585	84	53,7
Сидерат 412 / Siderat 412	0,586	0,460	85	53,4
Брянский сидерат / Bryanskiy siderat	0,782	0,492	84	49,6
Сидерат 38 / Siderat 38	0,781	0,573	83	45,2
Азуро / Azuro	0,851	0,444	96	58,6
Орловский сидерат / Orlovskiy siderat	0,695	0,159	81	48,0
HCP ₀₅ / LSD ₀₅	0,371	-	-	-

По продолжительности вегетационного периода все образцы, кроме сорта Азуро, близки к стандарту и отличаются скороспелостью. По высоте растений выделился сорт Азуро (58,6 см), превышение к стандарту составило 10,2 см.

Во ВНИИ люпина продолжается селекционная работа по накоплению исходного материала с целью создания нового сорта сидерального типа использования с улучшенными характеристиками [15, 16]. В таблицах 4 и 5 представлен структурный анализ новых сидеральных гибридных номеров. В качестве контроля взят сидеральный белорусский сорт Щучинский. Он отличается быстрым начальным ростом и симподиальным типом ветвления; линейный рост растений составил 90,3 см. По высоте растений небольшое (6,4 см) превышение к контролю имеет № 1764 (Сидерат 46 х Кормовой 344), который выделяется по элементам продуктивности и отличается мелкосемян-

ностью. Масса 1000 зерён у сорта Щучинский равна 192,9 г, у №1764 – 126,7 г. Для сидерального люпина мелкосемянность является положительным признаком – при посеве уменьшается весовая норма семенного материала.

Реципрокные гибридные номера (1749 и 1750) отличаются скороспелостью и уступают контролю и остальным представленным в таблице номерам по высоте растений. Выделился темпом начального роста (ТНР) и повышенной алкалоидностью (0,882 %) в сухом веществе зелёной массы гибрид № 1750 (Брянский сидерат х Сидерат 46). У остальных сидеральных сортов и номеров этот показатель варьирует в диапазоне 0,4-0,6 %.

Хорошей обсеменённостью бобов (5,2 шт.), количеством и массой семян с растения (105,4 шт. и 14,3 г) выделился № 1749 (Сидерат 46 х Брянский сидерат). Этот номер по количеству семян с растения превышает контроль более чем в два раза, по массе – на 6,2 г (табл. 5).

Таблица 4 – Характеристика растений гибридных номеров люпина узколистного сидерального типа по морфологическим признакам и продолжительности вегетационного периода (2022 г.) /
Table 4 – Characteristics of plants of the hybrid lines of the narrow-leaved lupine used as green manure for morphological characters and vegetation seasons length (2022 г.)

№ / No.	Сорт, комбинация / Variety, combination	Высота, см / Height, cm	Масса, г / Weight, g	ТНР*, балл / RIG, point	Вегетационный период, дни / Vegetation season, days
1668	Щучинский, контроль / Tshyutshinskiy, control	90,3	30,4	7	90
1671	Сидерат 46 х Кормовой 344 / Siderat 46 х Kormovoy 344	88,4	35,4	7	90-100
1749	Сидерат 46 х Брянский сидерат / Siderat 46 х Bryanskiy siderat	68,3	32,6	5	84
1750	Брянский сидерат х Сидерат 46 / Bryanskiy siderat x Siderat 46	68,6	26,9	7,5	85
1764	Сидерат 46 х Кормовой 344 / Siderat 46 х Kormovoy 344	96,7	39,0	7	97

* ТНР – темп начального роста / TIG – rate of initial growth

Таблица 5 – Характеристика растений гибридных номеров люпина узколистного сидерального типа по элементам продуктивности (2022 г.) /
Table 5 – Characteristics of plants of the hybrid lines of the narrow-leaved lupine used as green manure for productivity elements (2022)

№ / No.	Сорт, комбинация / Variety, combination	Количество с растения, шт. / Number per plant, pcs.		Масса семян с растения, г / Weight of seeds per plant, g	Масса 1000 семян, г / Weight of 1000 seeds, g	Число семян в бобе, шт. / Number of seeds in a pod, pcs.
		семена	бобы			
1668	Щучинский, контроль / Tshyutshinskiy, control	42,0	11,0	8,1	192,9	3,8
1671	Сидерат 46 х Кормовой 344 / Siderat 46 х Kormovoy 344	83,4	17,6	10,9	130,7	4,7
1749	Сидерат 46 х Брянский сидерат / Siderat 46 х Bryanskiy siderat	105,4	20,4	14,3	135,7	5,2
1750	Брянский сидерат х Сидерат 46 / Bryanskiy siderat x Siderat 46	71,4	15,2	10,6	148,5	4,7
1764	Сидерат 46 х Кормовой 344 / Siderat 46 х Kormovoy 344	96,4	22,0	12,2	126,7	4,4

Для сидерального люпина мелкосемянность является положительным признаком. Масса 1000 семян контрольного сорта составила 192,9 г, по новым номерам этот показатель варьирует от 126,7 до 148,5 г, снижение – 66,2-44,4 г. Обсеменённость бобов по новым номерам составила 4,4-5,2 семян в бобе, в контроле этот показатель равен 3,8 шт.

Заключение. В процессе исследований выявлены сорта и сортообразцы сидерального люпина узколистного, превосходящие стандарт по ряду показателей. Средняя урожайность зерна по опыту варьировала от 1,62 до 2,62 т/га,

зелёной массы – от 22,6 до 31,9 т/га. Прибавку к стандарту по урожайности зерна порядка 0,23-0,34 т/га обеспечили сорт Сидерат 38 и сортообразец Сидерат 265-19. Последний выделялся по содержанию алкалоидов в семенах (1,003 %) и сухом веществе зелёной массы (0,585).

Создан новый селекционный материал гибридного происхождения для дальнейшей селекции сорта сидерального типа использования. Перспективными номерами по морфобиологическим свойствам и продуктивности являются №1764 (Сидерат 46 х Кормовой 344) и №1749 (Сидерат 46 х Брянский сидерат).

Список литературы

1. Прянишников Д. Н. Избранные сочинения. М.: Сельхозгиз, 1963. Т.1. Агрохимия. 735 с.
2. Такунов И. П. Люпин в земледелии России. Брянск: Придесенье, 1996. 372 с.
3. Новиков М. Н., Тузилин В. М., Самохина О. А., Лисятников И. И. Система биологизации земледелия в Нечернозёмной зоне: науч.-практ. рекомендации на примере Владимирской области. М.: Росинформагротех, 2007. 295 с.
4. Чекмарёв П. А., Артюхов А. И., Юмашев Н. П., Яговенко Л. Л. Роль люпина в формировании плодородия почвы. Достижения науки и техники АПК. 2011;(10):17-20.
Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17041773> EDN: OIYBGB
5. Яговенко Г. Л., Белоус Н. М., Яговенко Л. Л. Люпин в земледелии Центрального региона России: влияние на агрохимические свойства серой лесной почвы и продуктивность севооборотов. Брянск: БГАУ, 2011. 183 с. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30556443> EDN: ZSRIKB
6. Егорова Г. П., Шеленга Т. В. Селекционный потенциал видов *Lupinus* L. из мировой коллекции ВИР. Научные труды по агрономии. 2020;1(3):4-9. DOI: <https://doi.org/10.37574/2658-7963-2020-1-4-9> EDN: GJFGQN
7. Агеева П. А., Почутина Н. А. Новый сорт узколистного люпина Сидерат 46. Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. 2016;1(53):9-13.
Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25414311> EDN: VKDRIZ
8. Лысенко О. Г. Люпин узколистный (*Lupinus angustifolius* L.) – сидеральная культура. Научные труды по агрономии. 2019;(2):45-50. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41619431> EDN: MEDBZA
9. Лысенко О. Г., Лысенко В. Ф., Пасынкова Е. Н. Сорт люпина узколистного (*Lupinus angustifolius* L.) Меценат. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2022;23(6):805-813.
DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2022.23.6.805-813> EDN: YZQORT
10. Агеева П. А., Матюхина М. В., Почутина Н. А., Громова О. М. Результаты и перспективы селекции сидеральных сортов узколистного люпина во Всероссийском научно-исследовательском институте люпина. Зернобобовые и крупяные культуры. 2020;(2):59-63. DOI: <https://doi.org/10.24411/2309-348X-2020-11170> EDN: XBKNMR
11. Наумкин В. Н., Наумкина Л. А., Куренская О. Ю., Лукашевич М. И., Агеева П. А. Оценка сортов люпина по урожайности и качеству семян, адаптивности и устойчивости растений к засухе. Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2019;(1):132-141. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37378400> EDN: XSUNBX
12. Агеева П. А., Почутина Н. А., Громова О. М., Зайцева Н. М. Люпин узколистный – результаты изучения сортов и сортообразцов по адаптивности и комплексу хозяйственно-биологических признаков. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2022;23(2):211-220. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2022.23.2.211-220> EDN: UJDUNL
13. Конончук В. В., Тимошенко С. М., Штырхунов В. Д., Назарова Т. О., Тулинова Е. А., Никиточкин Д. Н., Ахриев Х. А. Влияние гербицидной защиты, макро- и микроудобрений на азотфиксацию и зерновую продуктивность узколистного люпина в центре Нечернозёмной зоны РФ. Зернобобовые и крупяные культуры. 2023;(1):67-76. DOI: <https://doi.org/10.24412/2309-348X-2023-1-67-76> EDN: NWHZXX
14. GrowNotes. Lupines. WA, Grains Research and Development Corporation. DAFWA Publ., 2018. 486 pp.
15. Агаркова С. Н., Головина Е. В., Беляева Р. В. Формирование продуктивности сортами люпина узколистного в контрастных метеорологических условиях. Зернобобовые и крупяные культуры. 2019;(1):31-37. DOI: <https://doi.org/10.24411/2309-348X-2019-11070> EDN: VWAYNE
16. Головина Е. В., Беляева Р. В. Симбиотическая деятельность и формирование урожая люпина узколистного и сои в контрастных погодных условиях. Земледелие. 2022;(6):31-36.
DOI: <https://doi.org/10.24412/0044-3913-2022-6-31-36> EDN: IMJLCL

References

1. Pryanishnikov D. N. Selected works. Moscow: Sel'khozgiz, 1963. Vol.1. Agrochemistry. 735 p.
2. Takunov I. P. Lupine in Russian agriculture. Bryansk: Pridesen'e, 1996. 372 p.
3. Novikov M. N., Tuzhilin V. M., Samokhina O. A., Lisyatnikov I. I. System of biologization of agriculture in the Non-Chernozem zone: scientific and practical. recommendations based on the example of the Vladimir region. Moscow: Rosinformagrotekh, 2007. 295 p.
4. Chekmarev P. A., Artyukhov A. I., Yumashev N. P., Yagovenko L. L. Role of lupine in soil fertility formation. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK* = Achievements of Science and Technology of AICis. 2011;(10):17-20 (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17041773>
5. Yagovenko G. L., Belous N. M., Yagovenko L. L. Lupine in agriculture of the Central region of Russia: influence on the agrochemical properties of gray forest soil and productivity of crop rotations. Bryansk: BGAU, 2011. 183 p. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30556443>
6. Egorova G. P., Shelenga T. V. Selection potential of species *Lupinus* L. from the world VIR collection. *Nauchnye trudy po agronomii* = Research papers on agronomy. 2020;1(3):4-9. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.37574/2658-7963-2020-1-4-9>
7. Ageeva P. A., Pochutina N. A. The new narrow-leaved lupin variety Siderat 46. *Vestnik Bryanskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii* = Vestnik of the Bryansk State Agricultural Academy. 2016;1(53):9-13. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25414311>

8. Lysenko O. G. Narrow-leaved lupine (*Lupinus angustifolius* L.) – sidereal culture. *Nauchnye trudy po agronomii* = Research papers on agronomy. 2019;(2):45-50. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41619431>
9. Lysenko O. G., Lysenko V. F., Pasyukova E. N. Variety of narrow-leaved lupine (*Lupinus angustifolius* L.) Mezenat. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2022;23(6):805-813. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2022.23.6.805-813>
10. Ageeva P. A., Matyukhina M. V., Pochutina N. A., Gromova O. M. Results and outlook of breeding of sidereal narrow-leaved lupin varieties in the Russian lupine research institute. *Zernobobovye i krupyanye kul'tury* = Legumes and Groat Crops. 2020;(2):59-63. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24411/2309-348X-2020-11170>
11. Naumkin V. N., Naumkina L. A., Kurenskaya O. Yu., Lukashevich M. I., Ageeva P. A. Evaluation of lupine varieties for yield and seed quality, adaptability and plant resistance to drought. *Innovatsii v APK: problemy i perspektivy* = Innovations in Agricultural Complex: problems and perspectives. 2019;(1):132-141. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37378400>
12. Ageeva P. A., Potchutina N. A., Gromova O. M., Zaytseva N. M. Blue lupine (*Lupinus angustifolius* L.) – the results of varieties and accessions study according to adaptivity and a set of commercial biological traits. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2022;23(2):211-220. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2022.23.2.211-220>
13. Kononchuk V. V., Timoshenko S. M., Shtyrkhunov V. D., Nazarova T. O., Tulinova E. A., Nikitochkin D. N., Akhriev Kh. A. The effect of herbicidal protection, macro- and micro-fertilizers on nitrogen fixation and grain productivity of narrow-leaved lupine under different weather conditions in the center of the non-chernozem zone of the Russian Federation. *Zernobobovye i krupyanye kul'tury* = Legumes and Groat Crops. 2023;(1):67-76. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24412/2309-348X-2023-1-67-76>
14. GrowNotes. Lupines. WA, Grains Research and Development Corporation. DAFWA Publ., 2018. 486 pp.
15. Agarkova S. N., Golovina E. V., Belyaeva R. V. Formation of productivity by varieties of narrow-leaved lupine in contrasting meteorological conditions. *Zernobobovye i krupyanye kul'tury* = Legumes and Groat Crops. 2019;(1):31-37. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24411/2309-348X-2019-11070>
16. Golovina E. V., Belyaeva R. V. Symbiotic activity and crop formation in blue lupine and soybeans under contrasting weather conditions. *Zemledelie*. 2022;(6):31-36. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24412/0044-3913-2022-6-31-36>

Сведения об авторах

✉ **Агеева Прасковья Алексеевна**, кандидат с.-х. наук, ведущий научный сотрудник, руководитель направления селекции узколистного люпина, Всероссийский научно-исследовательский институт люпина – филиал ФГБНУ ФНЦ «ВИК им В. Р. Вильямса», ул. Берёзовая, д. 2, Брянский р-н, п. Мичуринский, Брянская обл., Российская Федерация, 241524, e-mail: lupin_mail@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5928-5168>, e-mail: lupin.labuzkolist@mail.ru

Почутина Наталья Александровна, старший научный сотрудник направления селекции узколистного люпина, Всероссийский научно-исследовательский институт люпина – филиал ФГБНУ ФНЦ «ВИК имени В. Р. Вильямса», ул. Берёзовая, д. 2, Брянский р-н, п. Мичуринский, Брянская обл., Российская Федерация, 241524, e-mail: lupin_mail@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8285-4880>

Мисникова Надежда Викторовна, ученый секретарь ВНИИ люпина, Всероссийский научно-исследовательский институт люпина – филиал ФГБНУ ФНЦ «ВИК им В. Р. Вильямса», ул. Берёзовая, 2, Брянский р-н, п. Мичуринский, Брянская обл., Российская Федерация, 241524, e-mail: lupin_mail@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5746-6539>

Information about the authors

✉ **Praskovya A. Ageeva**, PhD in Agricultural Science, leading researcher, Head of the Department of Narrow-Leafed Lupine Breeding, All-Russian Lupine Scientific Research Institute – branch of the Federal Williams Research Center of Forage Production & Agroecology, Berezovaya str. 2, p/o Michurinsky, Bryansk region, Russian Federation, 241524, e-mail: lupin_mail@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5928-5168>, e-mail: lupin.labuzkolist@mail.ru

Natalia A. Potchutina, senior researcher, the Department of Narrow-Leafed Lupine Breeding, All-Russian Lupine Scientific Research Institute – branch of the Federal Williams Research Center of Forage Production & Agroecology, Berezovaya str. 2, p/o Michurinsky, Bryansk region, Russian Federation, 241524, e-mail: lupin_mail@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8285-4880>

Nadezhda V. Misnikova, PhD in Agricultural Science, Research secretary, All-Russian Lupine Scientific Research Institute – branch of the Federal Williams Research Center of Forage Production & Agroecology, Berezovaya str. 2, p/o Michurinsky, Bryansk region, Russian Federation, 241524, e-mail: lupin_mail@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5746-6539>

✉ – Для контактов / Corresponding author

Оценка сортообразцов сафлора на продуктивность и качество в аридных условиях Северного Прикаспия

© 2023. Н. А. Зайцева ✉, И. И. Климова

ФГБНУ «Прикаспийский аграрный федеральный научный центр
Российской академии наук», с. Соленое Займище, Российская Федерация

В сухом континентальном климате сафлор имеет неоспоримое преимущество перед зерновыми и масличными культурами в силу своего морфологического строения. Основным достоинством данной культуры является то, что она способна развитой корневой системой добывать воду с глубоких слоев почвы, а за счет особенности строения вегетативной массы экономно ее расходовать, формируя при этом стабильные урожаи. Поэтому поиск перспективных сортообразцов для селекции новых сортов, особенно в засушливых условиях Астраханской области, не перестает быть актуальным. На протяжении трех лет (2019–2021 гг.) проводили изучение 28 коллекционных сортообразцов сафлора красильного различного эколого-географического происхождения из Федерального исследовательского центра Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н. И. Вавилова (ВИР). За период изучения по урожайности и ряду хозяйственно ценных признаков из коллекции выделили 12 сортообразцов для дальнейшего использования в селекционной работе. Продуктивность выделенных образцов изучаемой коллекции сильно варьировала в зависимости от условий года и в среднем превышала на 0,08...0,23 т/га стандартный сорт Астраханский 747. Наибольшую урожайность из отобранных сформировали образцы из Таджикистана (619 Цамбули, 618 Шахалли-260) и Казахстана (620 Ширкас, 622 Центр 70) – 0,43...0,51 т/га, что выше стандарта на 0,15...0,23 т/га. По содержанию масла в семенах (выше стандарта на 0,5...1,9 %) выделены сортообразцы: 621 Талан (Казахстан) – 30,3 %, 584 Sinaloa-90 (Мексика) – 30,3 %, 619 Цамбули (Таджикистан) – 29,4 %, 609 Акмай (Казахстан) – 29,1 %. Создание новых сортов на основе выделенных сортообразцов позволит получать стабильные урожаи в острозасушливых условиях региона.

Ключевые слова: сафлор красильный, сортообразцы, селекционная ценность, вегетационный период, семенная продуктивность, масличность

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Прикаспийский аграрный федеральный научный центр Российской академии наук» (тема № FNMW-2022-0010).

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

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов.

Для цитирования: Зайцева Н. А., Климова И. И. Оценка сортообразцов сафлора на продуктивность и качество в аридных условиях Северного Прикаспия. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2023;24(5):785–791.

DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.5.785-791>

Поступила: 16.03.2023 Принята к публикации: 04.10.2023 Опубликовано онлайн: 30.10.2023

Evaluation of safflower varieties for productivity and quality in the arid conditions of the Northern Caspian region

© 2023. Nadezhda A. Zaitseva ✉, Irina I. Klimova

Precaspian Agrarian Federal Scientific Center of the Russian Academy of Sciences,
Solenoje Zajmishhe, Russian Federation

In a dry continental climate, safflower has an undeniable advantage over grains and oilseeds due to its morphological structure. The main advantage of this crop is that it is capable of extracting water from deep layers of soil with its developed root system, and due to the structural features of the vegetative mass, it can use it economically, while forming stable yields. Therefore, the search for promising varieties for the selection of new varieties, especially in the arid conditions of the Astrakhan region, continues to be relevant. Over the course of three years (2019–2021), there were studied 28 collection varieties of safflower of various ecological and geographical origin from the Federal Research Center N. I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR). During the study period, 12 varieties were identified from the collection under study based on the yield and a number of economically valuable traits for further use in breeding work. The productivity of the selected samples of the studied collection varied greatly, depending on the conditions of the year and on average exceeded the standard variety Astrakhansky 747 by 0.08...0.23 t/ha. At the same time, the highest yield of the selected samples was from Tajikistan (619 Tsam-buli, 618 Shahalli-260) and Kazakhstan (620 Shirkas, 622 Center 70) – 0.43...0.51 t/ha, that was 0.15...0.23 t/ha higher than the standard. According to the oil content in the seeds (0.5...1.9 % higher than the standard) the following varieties were identified: 621 Talan (Kazakhstan) – 30.3 %, 584 Sinaloa-90 (Mexico) – 30.3 %, 619 Tsambuli (Tajikistan) – 29.4 %, 609 Akmai (Kazakhstan) – 29.1 %. The development of new varieties based on selected samples will allow to obtain stable yields in extremely arid conditions of the region.

Key words: dyer's saffron, varieties, breeding value, growing season, seed productivity, oil content

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 Precaspian Agrarian Federal Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (theme No. FNMW-2022-0010).

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

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

For citations: Zaitseva N. A., Klimova I. I. Evaluation of safflower varieties for productivity and quality in the arid conditions of the Northern Caspian region. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2023;24(5):785-791. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.5.785-791>

Received: 16.03.2023

Accepted for publication: 04.10.2023

Published online: 30.10.2023

Большая часть территорий Астраханской области представляет собой полупустыни с жарким и засушливым летом, часто сопровождающимся суховеями. Почвы сельскохозяйственных угодий региона представлены в северных районах зональными светло-каштановыми, в более южных – бурыми полупустынными с различной степенью солонцеватости.

Возделывание зерновых в богарных условиях нестабильно, а в годы с засухами не только нерентабельно, даже убыточно. Наметившаяся тенденция изменения климата в сторону еще большего повышения среднесуточных температур и сокращения количества осадков предполагает поиск и внедрение в севообороты культур, более приспособленных к изменяющимся условиям. В острозасушливых условиях заменить зерновые культуры способен сафлор красильный (*Carthamus tinctorius* L.), так как хорошо переносит засуху, приспосабливается к различным типам почв и может использоваться не только для кормовых целей, но и производства масла [1].

Сафлоровое масло бывает двух видов: с высоким содержанием мононенасыщенных жирных кислот (олеиновой) и с высоким содержанием полиненасыщенных жирных кислот (линолевой). Сафлоровое масло, имеющее большее количество олеиновой кислоты, содержит меньше насыщенных веществ и больше мононенасыщенных, чем оливковое масло, является более полезным и используется в качестве термостойкого растительного масла для жарки, а также при производстве косметических веществ. Сафлоровое масло с высоким содержанием линолевой кислоты используется в питании человека, служит ингредиентом для производства мыла, солнцезащитных и увлажняющих кремов, лосьонов, красок, олиф и т. д. В шроте сафлора может содержаться от 24 до

36 % белка, который можно использовать в качестве белковой добавки для скота и птицы [2].

Основными регионами-производителями сафлора на сегодняшний день являются Волгоградская, Ростовская и Саратовская области РФ. Большая часть урожая идет на экспорт в Китай, Японию и страны ЕС.

Сафлор является ранней яровой культурой. Семена начинают прорастать при температуре почвы +2...+3 °C (оптимальная +6...+8 °C). Всходы сафлора могут выдерживать небольшие заморозки до -6 °C. Для получения дружных всходов оптимальными являются условия постепенного нарастания среднесуточных температур воздуха, почвы и наличие влаги¹.

Сафлор практически не поражается болезнями и вредителями, а благодаря биологическим особенностям подавляет развитие сорняков, что также является его преимуществом [3]. Сафлор – экономически выгодная культура, так как имеет небольшую норму высева и высокий коэффициент размножения, что важно при его семеноводстве, рентабельность которого, по данным ряда ученых, может достигать 500 % [3, 4, 5].

Во всем мире для получения стабильных урожаев, высокого содержания масла в семенах сафлора проводится изучение генетического разнообразия селекционных линий и сортов. Например, в Индии, на основе исследований геномной мужской стерильности, созданы гибриды сафлора DSH-129 и NARI-NH-1 с потенциальной урожайностью 2,5 т/га [6]. В условиях Волгоградской области А. М. Кулешовым по комплексу признаков из коллекции ВИРа были выделены перспективные образцы 435 Мексика, 364 Иран, 507 Венгрия, Молдир Казахстан с урожайностью 1,36...1,56 т/га [7].

Содержание масла в семенах сафлора, по данным Б. Гүрбүз и М. Киралан (B. Gürbüz и M. Kiralan), зависит от сроков посева и сорта [8].

¹Овсянников А. В. Производство и экспорт сафлора в России. URL: https://news.rambler.ru/weather/50168434-proizvodstvo-i-eksport-saflora-v-rossii/?utm_source=copysharing&utm_medium=social (Дата обращения: 01.03.2023).

Установлено, что содержание жирных кислот в сафлоровом масле зависит от генотипа, места выращивания и температурного режима. Высокие температуры способствуют большему накоплению в семенах сафлора красильного олеиновой кислоты и снижению содержания линолевой кислоты [9]. Генетические исследования корней и листьев растений сафлора на ранних стадиях развития, проведенные рядом ученых, позволили установить гены, контролирующие накопление олеиновой и линолевой кислот [10, 11, 12, 13].

Цель исследования – испытать в засушливых условиях Астраханской области коллекционные сортаобразцы сафлора красильного различного эколого-географического происхождения, предоставленных ФИЦ Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н. И. Вавилова (ВИР), выделить доноры ценных признаков для дальнейшего использования в селекционной работе.

Новизна исследований – впервые в аридных условиях Северного Прикаспия проводится изучение агробиологического потенциала коллекции сортаобразцов сафлора красильного для выделения перспективных высокопродуктивных, адаптированных сортаобразцов.

Материал и методы. Полевые и лабораторные исследования проводили сотрудники лаборатории селекции сельскохозяйственных культур ФГБНУ «Прикаспийский федеральный аграрный научный центр Российской академии наук» в Черноярском районе Астраханской области на светло-каштановых почвах. Оценка изучаемых образцов на масличность² проведена в ФГБУ «ЦАС «Волгоградский».

Почвы, на которых размещались исследуемые сортаобразцы, характеризуются как светло-каштановые, карбонатные, мощные и среднемощные, легкосуглинистого состава. Реакция солевой вытяжки (рН) почвы опытного участка слабощелочная – 7,64. Слои почвы 0...0,2 и 0,2...0,5 м характеризовались очень низким содержанием гумуса (0,86-0,92 %), азота нитратного (3,0-4,9 мг/кг) и аммонийного (5,25-5,20 мг/кг почвы), подвижного фосфора (28,5-20,5 мг/кг почвы). Обеспеченность слоев почвы обменными соединениями калия очень высокая (265,0-228,5 мг/кг почвы).

В течение трех лет (2019-2021 гг.) в коллекционном питомнике сафлора красиль-

ного изучали 28 сортаобразцов, отличающихся по своему происхождению и морфобиологическим признакам. Коллекционный питомник сортаобразцов сафлора закладывали согласно общепринятым методикам³.

Посев проводили вручную рядовым способом, на богаре и орошении, на делянках площадью 1 м² в трехкратной повторности, через каждые 10 номеров высевали стандартный сорт Астраханский 747. Норма высева – 350 тыс. семян/га. Посев проводили при прогревании почвы на глубине заделки семян (4-5 см) до 4-5 °С.

Морфобиологические и хозяйственные признаки сафлора красильного оценивали согласно Классификатору вида⁴.

Результаты и их обсуждение. Погодные условия в период изучения сортаобразцов сафлора представлены в таблице 1.

Следует отметить минимальное количество осадков в апреле 2020 года, которое сильно повлияло на появление всходов и развитие растений на начальном этапе, но затем, в мае, быстрое нарастание среднесуточных температур и рекордное количество осадков – 41,5 мм позволили растениям быстро развиваться. В 2020 году среднесуточные температуры воздуха превышали среднемесячные значения в июне и июле на 1,6...1,7 °С, при этом количество осадков в эти месяцы было минимальным – 14,1 мм в июне и 0,7 мм в июле, что сократило вегетационный период всех изучаемых образцов. Из трех лет изучения 2020 год был самым засушливым, за период вегетации выпало всего 65,8 мм осадков, сумма активных температур составила 2456 °С, а значения гидротермического коэффициента не превышали 0,3.

Вегетационный период 2019 года характеризовался минимальной суммой активных температур – 1937 °С, осадков выпало 90 мм, ГТК составил 0,4. Анализ данных таблицы 1 показывает практически полное отсутствие осадков в период роста и развития растений сафлора и большое количество выпавших осадков в период его созревания – 58,0 мм (выше среднемесячных значений на 32,4 мм), что негативно повлияло на уборку урожая и его качество.

²ГОСТ 10857-64. Семена масличные. Метод определения масличности. М.: Стандартинформ, 2010. 6 с.

URL: <https://gostrf.com/normadata/1/4294840/4294840018.pdf>

³Доспехов Б. А. Методика полевого опыта с основами статистической обработки результатов исследования. М.: Агропромиздат, 1985. 351с.; Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур.

⁴Классификатор вида *Carthamus tinctorius* L. (сафлор красильный). Л.: ВИР, 1985. 15 с.

Таблица 1 – Характеристика погодных условий за период вегетации сортообразцов сафлора красильного (апрель-июль)/

Table 1 – Characteristics of weather conditions for the growing season of dyer's- saffron varieties (April- July)

Месяц / Month	Год / Year	Температура воздуха, °C / Air temperature, °C		Количество выпавших осадков, мм / Amount of precipitation, mm	Среднемного- летняя величина, мм / Long-term average, mm
		средне- месячная / average monthly	средняя многолетняя / average long-term		
Апрель / April	2019	11,3	11,1	18,8	15,1
	2020	8,5		9,5	
	2021	11,5		23,3	
Май / May	2019	19,5	18,6	8,9	20,9
	2020	16,3		41,5	
	2021	19,7		25,6	
Июнь / June	2019	26,9	24,1	4,9	15,8
	2020	25,7		14,1	
	2021	24,7		36,7	
Июль / July	2019	24,0	26,4	58,0	25,6
	2020	28,1		0,7	
	2021	27,9		24,9	

Наиболее благоприятным для растений сафлора сложился 2021 год (ГТК = 0,5). Сумма активных температур составила 2360 °C, осадков выпало 110,5 мм (выше на 33,1 мм среднемноголетних показателей), что положительно отразилось на продуктивности сафлора.

Сложившиеся погодные условия за годы изучения оказали влияние на продолжительность вегетационного периода и продуктивность сортообразцов сафлора красильного. Высокие среднесуточные температуры воздуха и недостаточное увлажнение почвы привели к сокращению межфазных периодов вегетации в 2020 году, а выпадение в отдельные месяцы рекордного количества осадков в 2020 и 2021 годах способствовало удлинению периода вегетации сортообразцов. Данные по продолжительности вегетационного периода 12 сортообразцов сафлора красильного, выделившихся в годы исследований, представлены в таблице 2.

Из приведенных данных в таблице 2 видно, что продолжительность вегетационного периода выделившихся сортообразцов сафлора красильного варьировала в зависимости от погодных условий года. Так, в 2020 году минимальное количество осадков на начальном периоде развития, а затем их полное отсутствие на фоне высоких среднесуточных температур в период созревания привело к укорачиванию вегетационного периода всех изучаемых сортообразцов и достижению ими физической спелости уже на 61...70 сутки.

В 2019 году, когда агрометеорологические условия периода активного роста и развития характеризовались практически полным отсутствием осадков (май – 8,9 мм, июнь – 4,9 мм), продолжительность периода от полных всходов до цветения составила 57...59 суток. Несмотря на выпавшие в июле (58,0 мм) осадки, от всходов до физической спелости у сортов проходило от 74 до 79 суток. Сортообразцы сафлора красильного 548 Lesaf 175-1 (Канада), 550 Gila и 584 Sinaloa-90 (Мексика), 622 Центр 70 (Казахстан) имели более продолжительный вегетационный период – 79 суток, чем у стандартного сорта Астраханский 747 (76 суток). Минимальная продолжительность периода вегетации отмечена у образцов 609 Акмай и 620 Ширкас из Казахстана и 618 Шахалли-260 из Таджикистана – 74 суток.

Агрометеорологические параметры в период роста и развития растений сафлора красильного в 2021 году также отличалась от среднемноголетних значений повышенными температурами воздуха и количеством выпавших осадков, что привело к увеличению продолжительности периода от всходов до цветения – от 53 до 82 суток. При этом неравномерность осадков в период формирования семян и их созревания способствовала увеличению периода от всходов до технической спелости у ряда сортообразцов, таких как 618 Шахалли-260 и 619 Цамбули из Таджикистана и 620 Ширкас из Казахстана до 96 суток.

Таблица 2 – Продолжительность вегетационного периода выделенных сортов сафлора красильного, сутки* /
 Table 2 – Duration of the growing season of the selected safflower varieties, days*

Название сорта / Sample name	2019 г.		2020 г.		2021 г.	
	всходы- цветение / germination- flowering	всходы-физ. спелость / germination - physical ripeness	всходы- цветение / germination- flowering	всходы-физ. спелость / germination - physical ripeness	всходы- цветение / germination- flowering	всходы- физ. спелость / germination - physical ripeness
Астраханский 747, ст. / Astrakhan 747, st.	59	76	41	61	62	77
548 Lesaf 175-1 (Канада) / 548 Lesaf 175-1 (Canada)	59	79	52	70	56	72
550 Gila (Мексика) / 550 Gila (Mexico)	59	79	52	70	56	72
561 Oker (Канада) / 561 Oker (Canada)	59	76	41	61	56	72
562 Centennial (Канада) / 562 Centennial (Canada)	58	76	41	67	60	71
584 Sinaloa-90 (Мексика) / 584 Sinaloa-90 (Mexico)	59	79	45	67	60	71
609 Акмай (Казахстан) / 609 Akmay (Kazakhstan)	57	74	43	61	56	69
618 Шахалли-260 (Таджикистан) / 618 Shahalli-260 (Tajikistan)	57	74	43	61	82	96
619 Цамбули (Таджикистан) / 619 Tsambuli (Tajikistan)	57	75	41	61	82	96
620 Ширкас (Казахстан) / 620 Shirkas (Kazakhstan)	57	74	41	61	82	96
621 Талан (Казахстан) / 621 Talan (Kazakhstan)	58	76	43	67	53	72
622 Центр 70 (Казахстан) / 622 Center 70 (Kazakhstan)	58	79	43	67	58	73
623 Алкызыл (Казахстан) / 623 Alkyzyl (Kazakhstan)	59	76	43	67	58	73

* 2019 год – 01.04 посев, 24.07 уборка; 2020 год – 30.03 посев, 27.07 уборка; 2021 год – 09.04 посев, 09.07 уборка /

* 2019 – 01.04 sowing, 24.07 harvesting; 2020 – 30.03 sowing, 27.07 harvesting; 2021 – 04/09 sowing, 07/09 harvesting

Урожайность сортов сафлора красильного в сложившихся агрометеорологических условиях периода изучения была невысокой у всех изучаемых сортов и сильно варьировала в зависимости от тепло- и влагообеспеченности.

Малопродуктивными выделены сорта сафлора в наиболее засушливый 2020 год, в котором сформировать высокую урожайность, по сравнению со стандартным сортом Астраханский 747 – 0,10 т/га, смогли образцы 584 Sinaloa-90 – 0,41 т/га и 562 Centennial – 0,35 т/га, у остальных образцов урожайность варьировала от 0,15...0,26 т/га (табл. 3).

Урожайность выделенных сортов сафлора в 2019 году варьировала от 0,23 до 0,57 т/га, самые высокие показатели получены у образцов 548 Lesaf 175-1 – 0,57 т/га, 621 Талан – 0,51 т/га, 618 Шахалли-260 – 0,50 т/га.

Наибольшую продуктивность показали сорта сафлора в более влагообеспеченном 2021 году – это 619 Цамбули – 0,90 т/га, 622 Центр 70 – 0,87 т/га, 623 Алкызыл – 0,74 т/га. У остальных образцов урожайность варьировала от 0,38 до 0,70 т/га.

В среднем за годы изучения наибольшую урожайность показали образцы 619 Цамбули, 618 Шахалли-260, 620 Ширкас, 622 Центр 70 – 0,43...0,51 т/га, что выше стандарта на 0,15...0,23 т/га.

Масса 1000 семян является одним из основных показателей в структуре урожая сафлора. В среднем за годы изучения у сортов сафлора признак «масса 1000 семян» находился в пределах 32,1...40,6 г, образцы сафлора 618 Шахалли-260, 620 Ширкас, 619 Цамбули, 622 Центр 70 превышали по этому показателю стандартный сорт Астраханский 747 (35,5 г) на 3,9...5,1 г.

Таблица 3 – Характеристика продуктивности сортообразцов сафлора красильного /
Table 3 – Characteristics of the productivity of safflower varieties

Название образца / Sample name	Урожайность, т/га / Productivity, t/ha				Масса 1000 семян, г / Weight of 1000 seeds, g	Масличность, % / Oil content, %	Лузжистость, % / Huskiness, %
	2019 г.	2020 г.	2021 г.	среднее/ average			
Астраханский 747, ст. / Astrakhan 747, st.	0,28	0,10	0,47	0,28	35,46	28,6	43,5
548 Lesaf 175-1	0,57	0,15	0,38	0,37	32,05	26,5	43,0
550 Gila	0,43	0,29	0,52	0,41	35,75	28,2	46,2
561 Oker	0,35	0,15	0,58	0,36	34,67	27,4	47,7
562 Centennial	0,26	0,35	0,52	0,38	33,94	28,0	47,1
584 Sinaloa-90	0,23	0,41	0,60	0,41	34,53	30,3	41,6
609 Акмай / 609 Akmay	0,30	0,15	0,67	0,37	36,90	29,1	42,1
618 Шахалли-260 / 618 Shahalli-260	0,50	0,10	0,70	0,43	40,45	27,0	43,2
619 Цамбули / 619 Tsambuli	0,42	0,20	0,90	0,51	39,45	29,4	45,7
620 Ширкас / 620 Shirkas	0,38	0,23	0,69	0,43	40,62	28,7	44,6
621 Талан / 621 Talan	0,51	0,21	0,52	0,41	36,77	30,5	43,1
622 Центр 70 / 622 Center 70	0,26	0,26	0,87	0,46	39,36	27,9	44,0
623 Алкызыл / 623 Alkyzyl	0,31	0,17	0,74	0,41	38,80	25,7	43,2
НСР ₀₅ / LSD ₀₅	0,06	0,09	0,08	-	-	-	-

Повышение содержания масла в семенах является одним из приоритетных направлений селекционной работы. По данному показателю нами были выделены образцы 621 Талан, 584 Sinaloa-90, 609 Акмай, 619 Цамбули, превышающие на 0,5...1,9 % стандартный сорт Астраханский 747 с содержанием масла 28,6 %.

Проводили отбор образцов с минимальной лузжистостью, так как чем меньше значения показателя «лузжистость», тем выше содержание масла в семенах. У сортообразцов сафлора 584 Sinaloa-90, 548 Lesaf 175-1, 609 Акмай, 621 Талан, 623 Алкызыл лузжистость составила 41,6...43,2 %, что меньше стандарта на 0,4...1,9 %.

Выводы. В результате проведенных трехлетних исследований по ряду хозяйственно ценных признаков и качественным показателям были выделены перспективные сортообразцы из изучаемой коллекции. В дальнейшем при создании новых сортов сафлора красильного для аридных условий Северного Прикаспия в качестве исходного материала будут образцы 618 Шахалли-260 и 619 Цамбули (Таджикистан), 584 Sinaloa-90 (Мексика), 548 Lesaf 175-1 (Канада), 621 Талан, 620 Ширкас, 622 Центр 70, 609 Акмай и 623 Алкызыл (Казахстан), которые превысили стандартный сорт Астраханский 747 по основным показателям.

Список литературы

1. Mosupiemang M., Emongor V. E., Malambane G. A Review of Drought Tolerance in Safflower. International Journal of Plant & Soil Science. 2022;34(10):140-149. DOI: <https://doi.org/10.9734/IJPSS/2022/v34i1030930>
2. Bergman J., Kandel H. Safflower Production. North Dakota State University Fargo, North Dakota, 2019. 4 p. URL: <https://www.ndsu.edu/agriculture/ag-hub/ag-topics/crop-production/crops/safflower/safflower-production>
3. Леонтьев В. И., Сухарева Е. П., Рябова Е. Н. Возделывание сафлора красильного в сухостепной зоне темно-каштановых почв Нижнего Поволжья. Научно-агрономический журнал. 2013;(1(92)):34-38.
4. Зайцева Н. А., Ячменева Е. В., Климова И. И., Дьяков А. С. Перспективные сортообразцы сафлора для возделывания в различных условиях увлажнения на светло-каштановых почвах Нижнего Поволжья. Теоретические и прикладные проблемы агропромышленного комплекса. 2021;(3):23-27. DOI: <https://doi.org/10.32935/2221-7312-2021-49-3-23-27> EDN: EOENOS
5. Зайцева Н. А., Ячменева Е. В., Климова И. И., Дьяков А. С. Изучение коллекционных образцов сафлора красильного в засушливых условиях Астраханской области. Аграрный научный журнал. 2021;(10):26-29. DOI: <https://doi.org/10.28983/asj.y2021i10pp26-29> EDN: NNJRWP
6. Singh V., Nimbkar N., Sameer K. C. V. Male Sterility and Hybrid Breeding Strategies in Safflower. 2022. pp. 251-263. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-19-3808-5_11
7. Кулешов А. М. Сортообразцы сафлора и их оценка в селекции на продуктивность и качество. Научно-агрономический журнал. 2019;(3(106)):29-32. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41420325> EDN: CYJJNJ
8. Gürbüz B., Kiralın M. Oil Content and Fatty Acid Composition of Some Safflower (*Carthamus tinctorius* L.) Varieties Sown in Spring and Winter. International Journal of Natural and Engineering Sciences. 2007;1(3):11-15. URL: https://www.researchgate.net/publication/242606175_Oil_Content_and_Fatty_Acid_Composition_of_Some_Safflower_Carthamus_tinctorius_L_Varieties_Sown_in_Spring_and_Winter

9. Çamaş N., Çirak C., Esendal E. Seed yield, oil content and fatty acids composition of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) grown in northern Turkey conditions. Journal of Agricultural Faculty OMU. 2007;22(1):98-104. URL: <https://paperity.org/p/198661672/seed-yield-oil-content-and-fatty-acids-composition-of-safflower-carthamus-tinctorius-l>
10. Büyük İ., Bolukbasi E., Aras S. Expression of CtFAD2 gene for early selection in safflower oleic/linoleic oil content. The Journal of Animal and Plant Sciences. 2016;26(5):1383-1388. URL: https://www.researchgate.net/publication/309538633_Expression_of_CtFAD2_gene_for_early_selection_in_safflower_oleiclinoleic_oil_content
11. Gavrilova V., Shelenga T., Porokhovinova E., Dubovskaya A., Kon'kova N., Grigoryev S., Podolnaya L., Konarev A., Yakusheva T., Kishlyan N., Pavlov A., Brutch N. The diversity of fatty acid composition in traditional and rare oil crops cultivated in Russia. Biological Communications. 2020;65(1):68-81. DOI: <https://doi.org/10.21638/spbu03.2020.106>
12. Cao S., Zhou X., Wood C., Green A., Singh S., Liu L., Liu Q. A large and functionally diverse family of Fad2 genes in safflower (*Carthamus tinctorius* L.). BMC Plant Biology. 2013;13:5. DOI: <https://doi.org/10.1186/1471-2229-13-5>
13. Cerrotta A., Lindström L. I., Echenique V. Selection tools for oil content and fatty acid composition in safflower (*Carthamus tinctorius* L.). Breeding Science. 2020;70(5):558-566. DOI: <https://doi.org/10.1270/jsbbs.20053>

References

1. Mosupiemang M., Emongor V. E., Malambane G. A Review of Drought Tolerance in Safflower. International Journal of Plant & Soil Science. 2022;34(10):140-149. DOI: <https://doi.org/10.9734/IJPSS/2022/v34i1030930>
2. Bergman J., Kandel H. Safflower Production. North Dakota State University Fargo, North Dakota, 2019. 4 p. URL: <https://www.ndsu.edu/agriculture/ag-hub/ag-topics/crop-production/crops/safflower/safflower-production>
3. Leontev V. I., Sukhareva E. P., Ryabova E. N. Cultivation of safflower in the dry steppe zone of dark chestnut soils of the Lower Volga region. *Nauchno-agronomicheskii zhurnal* = Scientific Agronomy Journal. 2013;(1(92)):34-38. (In Russ.).
4. Zaytseva N. A., Yachmeneva E. V., Klimova I. I., Dyakov A. S. Perspective cultivars of safflower for cultivation under different humidity conditions on light chestnut soils in the lower Volga region. *Teoreticheskie i prikladnye problemy agropromyshlennogo kompleksa* = Theoretical & Applied Problems of Agro-industry problems of Agro-industry. 2021;(3):23-27. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.32935/2221-7312-2021-49-3-23-27>
5. Zaytseva N. A., Yachmeneva E. V., Klimova I. I., Dyakov A. S. Study of dyed safflower collection samples under arid conditions of the Astrakhan region. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal* = The Agrarian Scientific Journal. 2021;(10):26-29. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.28983/asj.v2021i10pp26-29>
6. Singh V., Nimbar N., Sameer K. C. V. Male Sterility and Hybrid Breeding Strategies in Safflower. 2022. pp. 251-263. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-19-3808-5_11
7. Kuleshov A. M. Sortoobraztsy saflora i ikh otsenka v selektsii na produktivnost' i kachestvo. *Nauchno-agronomicheskii zhurnal* = Scientific Agronomy Journal. 2019;(3(106)):29-32. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41420325>
8. Gürbüz B., Kiralan M. Oil Content and Fatty Acid Composition of Some Safflower (*Carthamus tinctorius* L.) Varieties Sown in Spring and Winter. International Journal of Natural and Engineering Sciences. 2007;1(3):11-15. URL: https://www.researchgate.net/publication/242606175_Oil_Content_and_Fatty_Acid_Composition_of_Some_Safflower_Carthamus_tinctorius_L_Varieties_Sown_in_Spring_and_Winter
9. Çamaş N., Çirak C., Esendal E. Seed yield, oil content and fatty acids composition of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) grown in northern Turkey conditions. Journal of Agricultural Faculty OMU. 2007;22(1):98-104. URL: <https://paperity.org/p/198661672/seed-yield-oil-content-and-fatty-acids-composition-of-safflower-carthamus-tinctorius-l>
10. Büyük İ., Bolukbasi E., Aras S. Expression of CtFAD2 gene for early selection in safflower oleic/linoleic oil content. The Journal of Animal and Plant Sciences. 2016;26(5):1383-1388. URL: https://www.researchgate.net/publication/309538633_Expression_of_CtFAD2_gene_for_early_selection_in_safflower_oleiclinoleic_oil_content
11. Gavrilova V., Shelenga T., Porokhovinova E., Dubovskaya A., Kon'kova N., Grigoryev S., Podolnaya L., Konarev A., Yakusheva T., Kishlyan N., Pavlov A., Brutch N. The diversity of fatty acid composition in traditional and rare oil crops cultivated in Russia. Biological Communications. 2020;65(1):68-81. DOI: <https://doi.org/10.21638/spbu03.2020.106>
12. Cao S., Zhou X., Wood C., Green A., Singh S., Liu L., Liu Q. A large and functionally diverse family of Fad2 genes in safflower (*Carthamus tinctorius* L.). BMC Plant Biology. 2013;13:5. DOI: <https://doi.org/10.1186/1471-2229-13-5>
13. Cerrotta A., Lindström L. I., Echenique V. Selection tools for oil content and fatty acid composition in safflower (*Carthamus tinctorius* L.). Breeding Science. 2020;70(5):558-566. DOI: <https://doi.org/10.1270/jsbbs.20053>

Сведения об авторах

✉ Зайцева Надежда Александровна, кандидат с.-х. наук, научный сотрудник, зав. лабораторией селекции сельскохозяйственных культур, ФГБНУ «Прикаспийский аграрный федеральный научный центр Российской академии наук», ул. квартал Северный, д.8, с. Солёное Займище, Астраханская область, Российская Федерация, 416251, e-mail: pniaz@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8227-398X>, e-mail: rexham@rambler.ru

Климова Ирина Ивановна, младший научный сотрудник лаборатории селекции сельскохозяйственных культур, ФГБНУ «Прикаспийский аграрный федеральный научный центр Российской академии наук», ул. квартал Северный, д. 8, с. Солёное Займище, Астраханская область, Российская Федерация, 416251, e-mail: pniaz@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9582-3752>

Information about the authors

✉ Nadezhda A. Zaitseva, PhD in Agriculture, researcher, Head of the Laboratory for Breeding of Agricultural Crops, Precaspian Agrarian Federal Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, st. Severny quarter, 8, Solenoe Zaymishche, Astrakhan region, Russian Federation, 416251, e-mail: pniaz@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8227-398X>, e-mail: rexham@rambler.ru

Irina I. Klimova, junior researcher, the Laboratory for Breeding of Agricultural Crops, Precaspian Agrarian Federal Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, st. Severny quarter, 8, p. Solenoe Zaymishche, Astrakhan region, Russian Federation, 416251, e-mail: pniaz@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9582-3752>

✉ – Для контактов / Corresponding author

ЗАЩИТА РАСТЕНИЙ/PLANT PROTECTION

<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.5.792-798>



УДК 631.524.86:633.854.78

Разнообразие биотипов возбудителя ржавчины подсолнечника в регионах Российской Федерации

© 2023. Н. М. Арасланова✉, Т. С. Антонова, С. Л. Саукова, М. В. Ивебор
ФГБНУ «Федеральный научный центр «Всероссийский научно-исследовательский институт масличных культур имени В. С. Пустовойта», г. Краснодар, Российская Федерация

Распространение и развитие ржавчины на подсолнечнике в регионах Российской Федерации обусловлено появлением новых биотипов возбудителя, преодолевших устойчивость возделываемых сортов и гибридов. Цель исследований – идентифицировать в соответствии с международной номенклатурой изоляты возбудителя ржавчины подсолнечника, собранные в период 2020–2022 гг. в 8 регионах возделывания культуры: Краснодарском крае, Волгоградской, Саратовской, Воронежской, Ульяновской, Пензенской, Оренбургской, Тамбовской областях Российской Федерации. Для тестирования использовали линии-дифференциаторы устойчивости подсолнечника к ржавчине (СМ 90, СМ 29, Р-386, HAR-1, HAR-2, HAR-3, HAR-4, HAR-5) и восприимчивый ко всем расам патогена сорт ВНИИМК 8883. В соответствии с международной номенклатурой были идентифицированы в общей сложности 280 изолятов урединиоспор паразита, собранных с поражённых растений разных генотипов подсолнечника. В этой выборке были дифференцированы 27 биотипов возбудителя ржавчины. Обнаружены в РФ впервые 15 биотипов с кодовыми номерами: 320, 701, 703, 710, 720, 721, 730, 742, 744, 747, 761, 765, 766, 771, 777. Наиболее вирулентный биотип 777 выявлен в 2022 году среди изолятов из Волгоградской области. Биотип с кодовым номером 700 найден во всех представленных регионах и составил 50 % изученной выборки изолятов, что указывает на целесообразность проведения селекции подсолнечника на устойчивость к нему.

Ключевые слова: *Puccinia helianthi*, распространение, поражение, подсолнечник, линии-дифференциаторы, урединиоспоры, идентификация

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный научный центр «Всероссийский научно-исследовательский институт масличных культур имени В. С. Пустовойта» (тема № FGRU-2022-0009).

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Арасланова Н. М., Антонова Т. С., Саукова С. Л., Ивебор М. В. Разнообразие биотипов возбудителя ржавчины подсолнечника в регионах Российской Федерации. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2023;24(5):792-798. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.5.792-798>

Поступила: 20.06.2023

Принята к публикации: 05.10.2023

Опубликована онлайн: 30.10.2023

Diversity of sunflower rust pathogen biotypes in the regions of the Russian Federation

© 2023. Nina M. Araslanova✉, Tatyana S. Antonova, Svetlana L. Saukova, Maria V. Iwebor

V. S. Pustovoit All-Russian Research Institute of Oil Crops, Krasnodar, Russian Federation

The spread and development of sunflower rust in the regions of the Russian Federation is due to the emergence of new biotypes of the pathogen, which have overcome the resistance of cultivated varieties and hybrids. The aim of the research was to identify isolates of the sunflower rust pathogen collected in 2020–2022 in 8 regions of crop cultivation according to the internationally accepted classification: Krasnodar, Volgograd, Saratov, Voronezh, Ulyanovsk, Penza, Orenburg, and Tambov regions of the Russian Federation. Differential lines of sunflower rust resistance (CM 90, CM 29, R-386, HAR-1, HAR-2, HAR-3, HAR-4, HAR-5) and the variety VNIIMK 8883 susceptible to all races of the pathogen were used for testing. A total of 280 isolates of urediniospores of the parasite collected from infected plants of different sunflower genotypes were identified according to the internationally accepted classification. In this sample, 27 biotypes of rust pathogens were differentiated. There have been identified fifteen biotypes not previously found in Russia, their code numbers are 320, 701, 703, 710, 720, 721, 730, 742, 744, 747, 761, 765, 766, 771 and 777. The most virulent biotype 777 was detected in 2022 among isolates from the Volgograd region. The biotype with the code number 700 was detected in all the regions presented, accounting for 50 % of the sample of isolates studied. It is advisable to carry out sunflower breeding for its resistance.

Key words: *Puccinia helianthi*, spreading, infestation, sunflower, differential lines, urediniospores, identification

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 V. S. Pustovoi All-Russian Research Institute of Oil Crops (theme No. FGRU-2022-0009).

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

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

For citations: Araslanova N. M., Antonova T. S., Saukova S. L., Iwebor M. V. Diversity of sunflower rust pathogen biotypes in the regions of the Russian Federation. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2023;24(5):792-798. (In Russ.). <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.5.792-798>

Received: 20.06.2023

Accepted for publication: 05.10.2023

Published online: 30.10.2023

Ржавчина – распространенная болезнь подсолнечника, возбудителем которой является базидиальный гриб *Puccinia helianthi* Schwein, поражающий культуру во всех странах его возделывания с различной по годам степенью проявления и вредоносности [1]. Этот облигатный паразит обладает широким спектром вирулентности [2, 3, 4]. Появляющиеся новые биотипы преодолевают действие генов устойчивости подсолнечника [5]. Для идентификации биотипов *P. helianthi* по степени их вирулентности применяется международно принятый числовой триплетный код, вычисляемый по поражению 9 линий-дифференциаторов подсолнечника [5, 6]. Вирулентный код может меняться в зависимости от количества используемых линий-дифференциаторов устойчивости [7, 8, 9]. Долгое время сведения о поражении подсолнечника ржавчиной в регионах Российской Федерации носили фрагментарный характер или вовсе отсутствовали. Это связано с тем, что в некоторых регионах погодные условия не всегда благоприятствовали развитию гриба, признаки поражения растений появлялись в конце вегетационного периода и не влияли на их продуктивность. За 20-летний период (1994-2014 гг.) в Краснодарском крае, а также примыкающих к нему Ставропольском крае и Ростовской области ежегодно наблюдалось поражение подсолнечника ржавчиной от 0,5 до 50 % без существенного снижения урожайности [10]. В Тамбовской и Саратовской областях в 2010 и 2015 годах высокая влажность и контрастная в течение суток температура воздуха способствовали сильному развитию болезни – распространенность достигала 100 % при интенсивности поражения до 80 % [11]. По данным Российского сельскохозяйственного центра, в Саратовской, Пензенской, Волгоградской, Ульяновской, Оренбургской областях, Алтайском и Ставропольском краях в 2021 году наблюдались локальные участки с эпифитотийным развитием болезни. В Волго-Уральском регионе

снижение урожайности семян подсолнечника достигало 30 % в зависимости от возделываемых гибридов и их устойчивости к ржавчине¹. В 2018 году нами, при анализе вирулентности изолятов возбудителя ржавчины, впервые были выявлены 11 новых биотипов с кодовыми номерами: 304, 351, 352, 364, 704, 736, 740, 741, 745, 760, 762 [12].

Появление и распространение вирулентных биотипов, поражение многих сортов и гибридов подсолнечника в РФ указывает на необходимость продолжения исследований с привлечением большего количества изолятов из разных регионов.

Цель исследований – идентифицировать в соответствии с принятой международной номенклатурой изоляты возбудителя ржавчины подсолнечника, собранные в период 2020-2022 гг. в 8 регионах Российской Федерации.

Научная новизна – впервые на подсолнечнике, выращиваемом в регионах Российской Федерации, выявлены биотипы возбудителя ржавчины *Puccinia helianthi* Schwein с кодами вирулентности: 320, 701, 703, 710, 720, 721, 730, 742, 744, 747, 761, 765, 766, 771, 777.

Материал и методы. Исследования проводили в лаборатории иммунитета ФГБНУ «Федеральный научный центр «Всероссийский научно-исследовательский институт масличных культур имени В. С. Пустовойта» (ФГБНУ ФНЦ ВНИИМК). Для определения вирулентности возбудителя ржавчины использовали полевые изоляты, которые представляли собой совокупность урединиоспор, собранных на растениях разных сортов и гибридов подсолнечника отечественной и зарубежной селекции. Поражённые ржавчиной листья растений подсолнечника (рис. 1) были собраны на полях 8 регионов РФ, где возделывается эта культура. Урединиоспоры стряхивали или соскабливали на лист пергамента, затем помещали в криопробирки и хранили при температуре -20 °С.

¹10 самых распространенных болезней подсолнечника. [Электронный ресурс].

URL: <https://agrotrend.ru/news/18938-10-samyh-rasprostranennyh-bolezney-podsolnechnika> (дата обращения: 20.05.2023).



*Рис. 1. Лист подсолнечника, поражённый в сильной степени возбудителем ржавчины *Puccinia helianthi* Schwein /*

*Fig. 1. A sunflower leaf strongly infected with a rust pathogen *Puccinia helianthi* Schwein*

Семена линий-дифференциаторов устойчивости подсолнечника к ржавчине (СМ 90, СМ 29, Р-386, НАР-1, НАР-2, НАР-3, НАР-4, НАР-5) и сорта ВНИИМК 8883, используемого в качестве восприимчивого ко всем расам патогена, высевали рядами в цветочные ящики вместимостью 6 кг почвы и помещали в камеру искусственного климата, где растения выращивали при температуре 25 °С днём, 23 °С ночью и 16-часовом фотопериоде до появления второй пары настоящих листьев. Полив растений осуществляли ежедневно. Для определения жизнеспособности (всхожести) небольшое количество урединиоспор насыпали в чашки Петри с водой и выдерживали в течение 4-6 часов в темноте при температуре 18-20 °С. С помощью микроскопа подсчитывали количество урединиоспор с образовавшимися ростовыми трубками. Изоляты, у которых более 50 % урединиоспор образовали ростовые трубки, считались пригодными для заражения. Урединиоспоры каждого изолята отдельно помещали в дистиллированную воду, контролируя их концентрацию в суспензии с помощью камеры Горяева, доводя её до 100-110 тыс. штук на 1 мл воды в соответствии с рекомендацией Э. Б. Слюсарь [13]. Приготовленной суспензией опрыскивали растения-дифференциаторы, достигшие фазы развития 2-ой пары настоящих листьев, и помещали ящики с ними во влажную камеру на 24 часа. Затем выращивали в прежних условиях до появления признаков поражения на листьях. Влажность воздуха поддерживали до 90 % бытовым увлажнителем. Через 9 дней классифицировали устойчивость растений-дифферен-

циаторов в соответствии с их реакциями [14]. Тестирование считали достоверным при поражении контрольного восприимчивого генотипа подсолнечника со степенью более 30 пустул на листе.

Результаты и их обсуждение. В соответствии с принятой международной номенклатурой были идентифицированы в общей сложности 280 изолятов урединиоспор, собранных в 2020-2022 гг. с поражённых растений разных генотипов подсолнечника в Краснодарском крае, Волгоградской, Саратовской, Воронежской, Ульяновской, Пензенской, Оренбургской, Тамбовской областях. В этой выборке были дифференцированы 27 биотипов возбудителя ржавчины, из которых 15 с кодовыми номерами: 320, 701, 703, 710, 720, 721, 730, 742, 744, 747, 761, 765, 766, 771, 777 обнаружены нами в этих регионах впервые (табл. 1).

В суммарных по отдельным годам выборках изолятов из указанных выше регионов преобладали биотипы с кодовыми номерами 700, 300, 740, в незначительных количествах присутствовали 704, 710, 762.

Раса 100 (1 – по старой номенклатуре), широко распространённая в РФ в 80-е годы прошлого века, ещё присутствовала в единичных экземплярах в выборках изолятов 2020 и 2021 гг. Раса 300 (3 – по старой номенклатуре) ежегодно обнаруживалась в представленных регионах, отсутствуя лишь в выборке изолятов из Пензенской области (табл. 2). Вероятная причина длительного существования этих рас до настоящего времени кроется в сохранении среди возделываемого сортимента сортов-попу-

ляций подсолнечника отечественной селекции. По доступным источникам литературы, биотип 700 ранее не встречался в РФ и был впервые

обнаружен нами в 2017 году [15]. С 2020 года он преобладает в суммарной выборке изолятов из представленных регионов (табл. 1).

Таблица 1 – Биотипы возбудителя ржавчины подсолнечника, присутствующие в выборках изолятов разных лет сбора /

Table 1 – Biotypes of sunflower rust pathogen present among isolates of different collection years

Биотип / Biotype	Количество изолятов, шт. / Quantity of isolates, pieces			Всего / In total
	2020 г.	2021 г.	2022 г.	
100	1	1	0	2
300	7	9	19	35
304	0	2	0	2
320	0	0	2	2
351	0	1	0	1
364	0	2	0	2
700	41	48	62	151
701	0	1	0	1
703	0	0	2	2
704	1	8	4	13
710	1	2	4	7
720	1	0	2	3
721	0	1	0	1
730	0	0	1	1
740	5	11	9	25
741	1	2	2	5
742	0	0	1	1
744	0	4	1	5
745	1	1	0	2
747	0	0	1	1
760	1	0	2	3
761	0	0	1	1
762	1	1	2	4
765	0	0	3	3
766	0	0	1	1
771	0	0	2	2
777	0	0	4	4
Итого / Total	61	94	125	280

Изоляты из Краснодарского края в 2022 году отличались разнообразием по вирулентности. Из общего количества изолятов, собранных в этом регионе (38), было дифференцировано 13 биотипов. Половина изолятов принадлежала биотипу с кодовым номером 700 (табл. 2). Этот биотип преобладает и во всей совокупной за три года выборке изолятов. Другие восемь биотипов представлены в выборке этого года из Краснодарского края единичными экземплярами. Биотипы 703, 704, 300, 740

составили от 5 до 10 %. В выборках изолятов из других областей РФ, хотя и значительно меньших по количеству образцов, также прослеживалось преобладание биотипа 700. Например, из 18 изолятов из Ульяновской области 12 представляли собой биотип с кодовым номером 700. Биотип 777, наиболее вирулентный к использованному набору линий-дифференциаторов подсолнечника, был обнаружен пока только среди изолятов из Волгоградской области.

Таблица 2 – Соотношение биотипов возбудителя ржавчины подсолнечника в выборках изолятов из разных регионов РФ в 2022 году, шт.
Table 2 – The ratio of biotypes of the sunflower rust pathogen in samples of isolates from different regions of the Russian Federation in 2022, pcs

Биотип / Biotype	Регион / Region							
	Краснодарский / Krasnodarskiy	Волгоградский / Volgogradskiy	Саратовский / Saratovskiy	Воронежский / Voronezhskiy	Ульяновский / Ulyanovskiy	Пензенский / Penzenskyy	Оренбургский / Orenburgskiy	Тамбовский / Tambovskiy
300	3	2	1	7	4	0	1	1
320	0	0	1	0	0	0	0	1
700	19	5	4	5	12	4	7	6
703	2	0	0	0	0	0	0	0
704	2	0	0	0	0	1	1	0
710	0	1	0	0	2	0	1	0
720	1	1	0	0	0	0	0	0
730	1	0	0	0	0	0	0	0
740	4	0	0	0	0	3	1	1
741	0	0	0	0	0	2	0	0
742	0	0	0	1	0	0	0	0
744	0	0	0	1	0	0	0	0
747	0	0	0	1	0	0	0	0
760	1	0	0	0	0	0	0	1
761	1	0	0	0	0	0	0	0
762	1	0	0	0	0	0	0	0
765	1	0	1	0	0	1	0	0
766	0	0	0	1	0	0	0	0
770	1	0	0	0	0	0	0	0
771	1	0	0	1	0	0	0	0
777	0	4	0	0	0	0	0	0
Итого / Total	38	13	7	17	18	11	11	10

Данные, представленные в таблице 2, свидетельствуют о необходимости продолжения наблюдений за распространённостью ржавчины в посевах этой культуры в регионах РФ и идентификации биотипов возбудителя, собираемых на разных генотипах подсолнечника. В последние три десятилетия в Российской Федерации интенсивно возделывались разнообразные гибриды подсолнечника иностранной селекции. С этим напрямую может быть связано наблюдающееся возрастание вирулентности возбудителя болезни, разнообразие и разная частота встречаемости его биотипов в посевах подсолнечника и, в конечном итоге, распространение новых рас, занимающих обширные ареалы. Наиболее вирулентный биотип 777 выявлен впервые и в малом количестве. Чтобы его можно было называть расой, должен существовать восприимчивый к нему возделываемый сортимент подсолнечника, на котором он мог бы паразитировать, размножаться и увеличивать свой ареал распространения. Из доступных источников информации известно о возможности генетической рекомбинации в период эцидиальной стадии *P. helianthi*, которая приводит к появлению новых более вирулентных биотипов паразита [5]. Однако, поскольку возбудитель ржавчины подсолнечника является облигатным паразитом, то в природе, как правило, выживают и распространяются не самые вирулентные биотипы. Необходимы дальнейшие наблюдения за распространён-

ностью биотипов паразита с разными кодовыми номерами.

Успешное обеспечение продовольственной безопасности страны по растительному маслу подразумевает возделывание устойчивых к ржавчине отечественных сортов и гибридов подсолнечника, как основной масличной культуры. В этой связи остаются актуальными дальнейшие исследования по идентификации и отслеживанию частоты встречаемости разных биотипов возбудителя ржавчины в посевах подсолнечника, и использованию наиболее широко распространённых в создании устойчивых сортов и гибридов.

Заключение. Таким образом, в выборке изолятов возбудителя ржавчины подсолнечника (280 образцов), собранных в период 2020-2022 гг. в Краснодарском крае, Волгоградской, Саратовской, Воронежской, Ульяновской, Пензенской, Оренбургской, Тамбовской областях РФ, дифференцированы 27 биотипов *Puccinia helianthi* Schwein. Обнаружены нами в РФ впервые 15 биотипов с кодовыми номерами: 320, 701, 703, 710, 720, 721, 730, 742, 744, 747, 761, 765, 766, 771, 777. Наиболее вирулентный биотип 777 выявлен в 2022 году среди изолятов из Волгоградской области. Биотип с кодовым номером 700 обнаружен во всех представленных регионах и составил 50 % изученной выборки изолятов, что указывает на целесообразность проведения селекции подсолнечника на устойчивость к нему.

References

1. Sackston W. Studies on sunflower rust. III. Occurrence, distribution, and significance of races of *Puccinia helianthi* Schw. Canadian Journal of Botany. 1962;40:1449-1458. DOI: <https://doi.org/10.1139/b62-139>
2. Gulya T. J. The sunflower rust situation: current races in the northern and central Great Plains, and resistance in oilseed and confection hybrids. In: Proceedings of the 28th sunflower research workshop. Fargo, ND, 11-12 January 2006. 8 p. URL: <https://fliphtml5.com/oogm/gxfc/basic>
3. Gulya T. J., Maširević S. Inoculation and evaluation methods for sunflower rust. Proc. 18th Sunflower Research Workshop. National Sunflower Association. Bismarck, ND. 1996. pp. 31-38.
4. Guo D., Jing L., Hu W. J., Li X., Navi S. Sh. Race identification of sunflower rust and the reaction of host genotypes to the disease in China. Biology European Journal of Plant Pathology. 2016;144:419-429. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10658-015-0778-5>
5. Friskop A. J., Gulya T. J., Harveson R. M., Humann R. M., Acevedo M., Markell S. G. Phenotypic diversity of *Puccinia helianthi* (sunflower rust) in the United States from 2011 and 2012. Plant Disease. 2015;99(11):1604-1609. DOI: <https://doi.org/10.1094/PDIS-11-14-1127-RE>
6. Markell S. G., Friskop A. J., Gulya T. J. Rust pathogen: *Puccinia helianthi*. In: Compendium of Sunflower Diseases. American Phytopathological Society. 2016. St. Paul, MN. pp. 114-115
7. Sendall B. C., Kong G. A., Goulter K. C., Aitken E. A. B., Thompson S. M., Mitchell J. H. M., Kochman J. K., Lawson W., Shatte T., Gulya T. J. Diversity in the sunflower: *Puccinia helianthi* pathosystem in Australia. Australasian Plant Pathology. 2006;35(6):657-670. DOI: <https://doi.org/10.1071/AP06071>
8. Gulya T., Harveson R., Mathew F., Block C., Thompson S., Kandel H., Berglund D., Sandbakken J., Kleingartner L., Markell S. Comprehensive disease survey of U.S. sunflower: Disease trends, research priorities and unanticipated impacts. Plant Disease. 2019;103(4):601-618. DOI: <https://doi.org/10.1094/PDIS-06-18-0980-FE>
9. Gilley M. A., Gulya T. J., Seiler G. J., Underwood W., Hulke B. S., Misar C. G., Markell S. G. Determination of virulence phenotypes of *Plasmopara halstedii* in the United States. Plant Disease. 2020;104(11):2823-2831. DOI: <https://doi.org/10.1094/PDIS-10-19-2063-RE>

10. Децына А. А., Терещенко Г. А., Илларионова И. В. Распространённость ржавчины на сортах подсолнечника в условиях Краснодарского края. Масличные культуры. Научно-технический бюллетень Всероссийского научно-исследовательского института масличных культур. 2018;(2(174)):101-106.

DOI: <https://doi.org/10.25230/2412-608X-2018-2-174-101-106> EDN: XTCVPV

Detsyna A. A., Tereshchenko G. A., Illarionova I. V. The occurrence of rust on sunflower varieties in the conditions of the Krasnodar region. *Maslichnye kul'tury. Nauchno-tekhnicheskii byulleten' Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta maslichnykh kul'tur* = Oil crops. Scientific and technical Bulletin of VNIIMK. 2018;(2(174)):101-106. (In Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.25230/2412-608X-2018-2-174-101-106>

11. Выприцкая А. А. Микобиота подсолнечника в Тамбовской области. Тамбов: Принт-Сервис, 2015. 143 с.

Vyprietskaya A. A. Sunflower mycobiota in the Tambov region. Tambov: *Print-Servis*, 2015. 143 p.

12. Araslanova N., Antonova T., Lepeshko E., Usatenko T., Saukova S., Iwebor M., Pitinova Y. New races of rust pathogen on sunflower in Russia. *Helia*. 2021;44(75):147-154. DOI: <https://doi.org/10.1515/helia-2021-0007>

13. Слюсарь Э. Л. Расы ржавчины подсолнечника. Защита растений. 1981;(11):42-43.

Slyusar' E. L. Races of sunflower rust. *Zashchita rasteniy*. 1981;(11):42-43. (In Russ.).

14. Yang S. M., Antonelli E. E., Luciano H., Lucina N. D. Reactions of Argentine and Australian Sunflower Rust Differentials to Four North American Cultures of *Puccinia helianthi* from North Dakota. *Plant Disease*. 1986;70:883-886.

URL: https://www.apsnet.org/publications/PlantDisease/BackIssues/Documents/1986Articles/PlantDisease70n09_883.pdf

15. Арасланова Н. М., Ивебор М. В., Антонова Т. С., Хатнянский В. И. Определение расовой принадлежности изолятов ржавчины (*Puccinia helianthi* Schwein), поражающей подсолнечник в некоторых регионах РФ. Масличные культуры. Научно-технический бюллетень Всероссийского научно-исследовательского института масличных культур. 2019;(4 (180)):107-112. DOI: <https://doi.org/10.25230/2412-608X-2019-4-180-107-112> EDN: ZLPUBA

Araslanova N. M., Iwebor M. V., Antonova T. S., Khatnyanskiy V. I. Race identification of isolates of *puccinia helianthi* schwein. that affects sunflower in some regions of Russia. *Maslichnye kul'tury. Nauchno-tekhnicheskii byulleten' Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta maslichnykh kul'tur* = Oil crops. Scientific and technical Bulletin of VNIIMK. 2019;(4 (180)):107-112. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.25230/2412-608X-2019-4-180-107-112>

Сведения об авторах

✉ **Арасланова Нина Михайловна**, кандидат с.-х. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории иммунитета, ФГБНУ «Федеральный научный центр «Всероссийский научно-исследовательский институт масличных культур имени В. С. Пустовойта», ул. им. Филатова, д. 17, г. Краснодар, Российская Федерация, 350038,

e-mail: vniimk@vniimk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3607-9254>, e-mail: araslanova-nina@mail.ru

Антонова Татьяна Сергеевна, доктор биол. наук, главный научный сотрудник, руководитель лаборатории иммунитета, ФГБНУ «Федеральный научный центр «Всероссийский научно-исследовательский институт масличных культур имени В. С. Пустовойта», ул. им. Филатова, д. 17, 350038 г. Краснодар, Российская Федерация,

e-mail: vniimk@vniimk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8915-1136>

Саукова Светлана Леонидовна, кандидат биол. наук, старший научный сотрудник лаборатории иммунитета, ФГБНУ «Федеральный научный центр «Всероссийский научно-исследовательский институт масличных культур Россия имени В. С. Пустовойта», ул. им. Филатова, д. 17, г. Краснодар, Российская Федерация, 350038,

e-mail: vniimk@vniimk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2176-3491>

Ивебор Мария Вячеславовна, кандидат с.-х. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории иммунитета, ФГБНУ «Федеральный научный центр «Всероссийский научно-исследовательский институт масличных культур Россия имени В. С. Пустовойта», ул. им. Филатова, д. 17, г. Краснодар, Российская Федерация, 350038,

e-mail: vniimk@vniimk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3973-2965>

Information about the authors

✉ **Nina M. Araslanova**, PhD in Agriculture, leading researcher, the Laboratory of Immunity, V. S. Pustovoi All-Russian Research Institute of Oil Crops, Russia, 17 Filatova str., Krasnodar, Russian Federation, 350038, e-mail: vniimk@vniimk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3607-9254>, e-mail: araslanova-nina@mail.ru

Tatyana S. Antonova, DSc in Biology, chief researcher, Head of the Laboratory of Immunity, V. S. Pustovoi All-Russian Research Institute of Oil Crops, Russia, 17 Filatova str., Krasnodar, Russian Federation, 350038, e-mail: vniimk@vniimk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8915-1136>

Svetlana L. Saukova, PhD in Biology, senior researcher, the Laboratory of Immunity, V. S. Pustovoi All-Russian Research Institute of Oil Crops, Russia, 17 Filatova str., Krasnodar, Russian Federation, 350038, e-mail: vniimk@vniimk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2176-3491>

Maria V. Iwebor, PhD in Agriculture, leading researcher, the Laboratory of Immunity, V. S. Pustovoi All-Russian Research Institute of Oil Crops, Russia, 17 Filatova str., Krasnodar, Russian Federation, 350038, e-mail: vniimk@vniimk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3973-2965>

✉ – Для контактов / Corresponding author

СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ МИКРОБИОЛОГИЯ И МИКОЛОГИЯ / AGRICULTURAL MICROBIOLOGY AND MYCOLOGY

<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.5.799-809>
УДК 579.87



Изучение агрономически ценных синергетических эффектов в бинарных культурах почвенных стрептомицетов

© 2023. Н. А. Боков✉, Р. И. Абубакирова, И. Г. Широких
ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока
имени Н. В. Рудницкого», г. Киров, Российская Федерация

Совместное культивирование микроорганизмов может быть действенным способом управления их ферментативной активностью и синтезом вторичных метаболитов, базирующимся на явлении синергизма. В работе проведена оценка влияния совместного культивирования в различных сочетаниях четырех местных изолятов рода *Streptomyces* на их целлюлазную активность, антифитопатогенное и фиторегуляторное действие. Штаммы *S. antimycoticus* 8A13 и *Streptomyces* sp. H 27-25 проявляли антагонистическое действие по отношению к грибам рода *Fusarium* и *Alternaria*. В составе бинарных культур присутствовали штамм-целлюлозолитик и штамм-антагонист. Существенно более высокую целлюлазную активность в сравнении с монокультурой (3800 усл. ед./10 мин /г) продемонстрировала бинарная ассоциация штаммов *S. griseoaurantiacus* Mb 4-2 + *S. antimycoticus* 8A13 (13215 усл. ед./10 мин/г). При сокультивировании этих изолятов отмечено также увеличение антифунгальной активности бинарной культуры (18,76±6,1 мм) по сравнению с входящим в ее состав *S. antimycoticus* 8A13 (11,09±6,39 мм). Средняя величина зон ингибирования роста фитопатогенных грибов (18,76±6,1 мм) была сопоставима с таковыми у препарата сравнения – коммерческого антимикотика тербинафина (19,8±6,2 мм). Бинарные искусственные ассоциации в тестах на фиторегуляторное действие, как и монокультуры входящих в них изолятов стрептомицетов, не оказали существенного влияния на всхожесть и морфометрию проростков пшеницы. Отсутствие фитоингибирующего действия бинарной культуры *S. griseoaurantiacus* Mb 4-2 + *S. antimycoticus* 8A13, при сочетании таких агрономически ценных свойств, как целлюлазная активность и антагонизм к фитопатогенным грибам, дают основание к ее использованию для разработки почвоулучшающего биопрепарата. Дальнейшее изучение свойств бинарной ассоциации, в частности возможности ее комбинации с PGPR-бактериями (*Plant Growth-Promoting Rhizobacteria*), составит предмет дальнейших исследований.

Ключевые слова: актиномицеты, совместное культивирование, целлюлазная активность, антагонизм, фиторегуляторная активность

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого» (тема № FNWE-2022-0005).

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Боков Н. А., Абубакирова Р. И., Широких И. Г. Изучение агрономически ценных синергетических эффектов в бинарных культурах почвенных стрептомицетов. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2023;24(5):799-809. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.5.799-809>

Поступила: 26.06.2023

Принята к публикации: 02.10.2023

Опубликована онлайн: 30.10.2023

Study of agronomically valuable synergistic effects in binary cultures of soil streptomycetes

© 2023. Nikita A. Bokov✉, Roza I. Abubakirova, Irina G. Shirokikh
Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky, Kirov,
Russian Federation

Co-culturing of microorganisms can be an effective way to control their enzymatic activity and synthesis of secondary metabolites based on the phenomenon of synergism. The effect of co-culturing in different combinations of four local *Streptomyces* isolates on their cellulase activity, antiphytopathogenic and phyto regulatory effects was evaluated. Strains *S. antimycoticus* 8A13 and *Streptomyces* sp. H 27-25 exhibited an antagonistic effect against fungi of the genus *Fusarium* and *Alternaria*. Binary cultures were composed so that the cellulolytic and antagonist strains were present. Significantly higher cellulase activity in comparison with monoculture (3800 units/10 min/g) was demonstrated by the binary association of strains *S. griseoaurantiacus* Mb 4-2 + *S. antimycoticus* 8A13 (13215 units/10 min/g). When these isolates were co-cultured, an increase in the antifungal activity of the binary culture (18.76±6.1 mm) compared to that of its constituent *S. antimycoticus* 8A13 (11.09±6.39 mm)

was also noted. The mean value of the growth inhibition zones of phytopathogenic fungi (18.76 ± 6.1 mm) was comparable with that of the reference preparation, the commercial antimycotic terbinafine (19.8 ± 6.2 mm). Binary artificial associations in tests for phyto regulatory action, as well as monocultures of their constituent streptomycete isolates, had no significant effect on germination and morphometry of wheat seedlings. The absence of phytoinhibitory effect of the binary culture *S. griseoaurantiacus* Mb 4-2 + *S. antimycoticus* 8A13, combined with agronomically valuable properties such as cellulase activity and antagonism to phytopathogenic fungi give grounds for its use for the development of a soil-improving biopreparation. Further study of the properties of the binary association, in particular, the possibility of its combination with PGPR-bacteria (Plant Growth-Promoting Rhizobacteria), will constitute the subject of further research.

Keywords: actinomycetes, co-cultivation, cellulase activity, antagonism, phyto regulatory activity

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-2022-0005).

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

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

For citation: Bokov N. A., Abubakirova R. I., Shirokikh I. G. Study of agronomically valuable synergistic effects in binary cultures of soil streptomycetes. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2023;24(5):799-809. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.5.799-809>

Received: 26.06.2023

Accepted for publication: 02.10.2023

Published online: 30.10.2023

Взросший в последнее время в аграрном секторе спрос на биологические препараты стимулирует интерес к поиску все новых продуцентов биологически активных соединений, способствующих повышению урожайности и качества сельскохозяйственных культур при сохранении экологического состояния агроценозов [1]. Почвенные мицелиальные бактерии – актиномицеты, в особенности представители самого распространенного в почвах рода *Streptomyces*, являются продуцентами рекордного среди прокариот количества антибиотиков, способных оказывать влияние на фитопатогенные организмы. Экологические функции стрептомицетов связаны также с разложением в почве растительных полимеров, основная доля которых представлена целлюлозой. Однако комплекс целлюлазных ферментов стрептомицетов используется довольно ограниченно не только в промышленных, но и аграрных технологиях. Адаптированные к почвенным условиям стрептомицеты могут служить основой к созданию почвоулучшающих препаратов, способствующих быстрому разложению в агроценозах растительных остатков и сокращению пула почвенных инфекций.

Бактерии рода *Streptomyces* богаты кластерами биосинтетических генов, большинство из которых еще не изучены или изучены слабо [2]. Наряду с функционирующими генами, у стрептомицетов распространены кластеры так называемых «спящих» биосинтетических генов [3], которые не всегда экспрессируются, что ограничивает метаболический потенциал агрономически ценных штаммов, растущих в лабораторных условиях в виде монокультур.

Совместное культивирование разных видов бактерий *in vitro* отчасти моделирует сложные природные межорганизменные взаимодействия с помощью секретируемых в окружающую среду метаболитов и сигнальных молекул [4, 5]. Рядом авторов было показано, что при сокультивировании микробных культур может происходить активация «спящих» генов, что приводит к увеличению выхода и разнообразия микробных метаболитов [6]. Так, совместное культивирование *Streptomyces* sp. MA37 и *Pseudomonas* sp. привело к продукции нескольких метаболитов, которые ранее не были выявлены в монокультурах каждой из бактерий [3]. В результате совместного культивирования *Streptomyces albireticuli* MDJK11 и *Streptomyces albofavius* MDJK44 повысилась способность штаммов к мобилизации фосфора и стимуляции роста корней и проростков пшеницы [7]. С помощью совместного культивирования бактерий *Streptomyces tendae* KMC006 и *Gordonia* sp. KMC005 был выделен новый ациклический полиеновый поликетид с антимикробной активностью в отношении *Micrococcus luteus* и *Enterococcus hirae* [8].

Приведенные из литературы примеры синергетических эффектов бинарных культур стрептомицетов позволяют рассматривать совместное культивирование как простой и достаточно эффективный способ, позволяющий обнаруживать новые вторичные метаболиты, а также повышать выход ранее известных соединений. Совместное культивирование может дополнить или даже частично заменить такие традиционные методы стимуляции продукции метаболитов и ферментов, как оптимизация условий культивирования [9, 10] или

генная инженерия [11, 12], которые являются значительно более трудоемкими и дорогостоящими. Вместе с тем, информации о том, позволяет ли совместное культивирование регулировать уже имеющиеся агрономически ценные свойства штаммов за счет синергетических эффектов, в отечественной научной литературе пока недостаточно.

Цель работы – провести сравнительную оценку монокультур четырех местных штаммов стрептомицетов с полученными на их основе тремя бинарными ассоциациями по параметрам целлюлазной и антимикробной активности, фиторегуляторной способности.

Научная новизна – в работе впервые для местных почвенных изолятов рода *Streptomyces* продемонстрирована возможность увеличения целлюлазной активности и её пролонгации во времени, усиления антифунгального действия в отношении грибных фитопатогенов с помощью попарного объединения штаммов в бинарных культурах. Отсутствие фитотоксических эффектов при совместном культивировании стрептомицетов позволяет рассматривать полученные искусственные ассоциации как основу для создания биопрепарата с почвоулучшающим действием.

Материал и методы. Объектами исследования служили четыре природных изолята бактерий, выделенные из почв разных типов с использованием селективного приема на среде с гидролизатом казеина¹. На основании изучения культуральных и морфологических свойств

все штаммы были отнесены к роду *Streptomyces*. С помощью секвенирования последовательностей фрагмента гена 16S рРНК для трех изолятов определено филогенетическое положение. Последовательности депонированы в международной генетической базе NCBI. Характеристика изолятов приведена в таблице 1.

В предыдущих исследованиях две культуры (штаммы Мб 4-2 и 1.3) проявили целлюлазную активность [13, 14], два других (штаммы 8А13 и Н 27-25) отличались выраженным антифунгальным действием по отношению к грибам родов *Fusarium* и *Alternaria* [15]. С учетом выявленных у изолятов агрономически ценных свойств были составлены три бинарные культуры, в которых один микроорганизм являлся антагонистом по отношению к фитопатогенам, а другой – активным целлюлолитиком: 1) *S. griseoaurantiacus* Мб 4-2 + *S. antimycoticus* 8А13; 2) *S. thermocarboxydus* 1.3 + *S. antimycoticus* 8А13; 3) *S. griseoaurantiacus* Мб 4-2 + *Streptomyces* sp. Н 27-25. Инокуляты для объединения в бинарных культурах получали, используя жидкую питательную среду Гаузе-1². Штаммы культивировали при 28 °С стационарно в течение 5 суток. Титры пропагул в полученных жидких культурах (ЖК) составили для *S. griseoaurantiacus* Мб 4-2, *S. antimycoticus* 8А13, *S. thermocarboxydus* 1.3 и *Streptomyces* sp. Н 27-25 соответственно $2,5 \times 10^7$, $2,5 \times 10^4$, $2,5 \times 10^8$ и $2,5 \times 10^6$. Для получения бинарных культур инокуляты разных штаммов вносили в соответствующую питательную среду в равных объемах.

Таблица 1 – Источники выделения и результаты идентификации изолятов /
Table 1 – Sources of isolation and results of isolate identification

Штамм / Strain	Источник выделения: почва, географический пункт / Source of isolation: soil, geographical location	Филогенетическое положение штамма / Phylogenetic position of the strain	Номер в NCBI / NCBI number
Мб 4-2	Подзол песчаный мелкий на древнеаллювиальных песках, Медведский бор, Кировская обл. / Fine sandy podzol on ancient alluvial sands, Medvedsky Bor, Kirov region	<i>S. griseoaurantiacus</i>	ON164840.1
1.3	Выработанный торфяник низинного типа, п. Оричи, Кировская область / Exhausted peat bog of lowland type, Orichi village, Kirov region	<i>S. thermocarboxydus</i>	ON164813.1
8А13	Дерново-подзолистая почва из ризосферы табака, г. Киров / Soddy-podzolic soil from the rhizosphere of tobacco, Kirov	<i>S. antimycoticus</i>	MT114717
Н 27-25	Серая лесная почва, г. Нижний Новгород / Gray forest soil, Nizhny Novgorod	<i>Streptomyces</i> sp.	Нет

¹Зенова Г. М. Почвенные актиномицеты: учебное пособие. М.: МГУ, 1992. 78 с.

²Там же.

Для определения целлюлазной и антимикробной активности, фиторегуляторного действия стрептомицеты выращивали в минеральной жидкой среде следующего состава (г/л): K_2HPO_4 – 2; NaCl – 2; $MgSO_4 \times 7H_2O$ – 1; $MnSO_4$ – 0,05; $FeSO_4 \times 7H_2O$ – 0,05; $CaCl_2 \times 2H_2O$ – 2. В качестве единственного источника углерода в жидкую среду вносили измельченную солому (10 г/л). Культивация осуществлялась при 28 °С стационарно в течение 5 суток для оценки антагонистической и фиторегуляторной активности. Определение ферментативной активности проводили через 24, 48, 72 и 144 часа от начала культивирования. Биомассу бактерий осаждали центрифугированием в течение 10 минут при 6000 об./мин.

Целлюлазную активность определяли спектрофотометрически (540 нм) в супернатанте с использованием реактива на основе динитросалициловой кислоты (ДНС)³. В качестве субстрата служила микрокристаллическая целлюлоза (1 %). Реакцию гидролиза проводили при 50 °С в течение 20 мин. За единицу активности принимали такое количество фермента, при действии которого на субстрат в условиях ферментативной реакции за 1 час образуется 1 мкмоль редуцирующих сахаров в пересчете на глюкозный эквивалент.

Для оценки антимикробного действия стрептомицеты выращивали тест-культуры фитопатогенных грибов и бактерий при 28 °С на скошенном агаре Чапека и среде RHM соответственно⁴. В качестве тест-культур использовали грибы: *Fusarium avenaceum*, *F. moniliforme*, *F. oxysporum*, *F. proliferatum*, *F. culmorum*, *Alternaria* sp., *Bipolaris sorokiniana* и бактерии: *Curtobacterium flaccumfaciens* 29r4, *Bacillus* sp. 29r3, *Pseudomonas fluorescens* 1A4, *Flavobacterium saccharophilum* 3A5, *Clavibacter michiganensis* H6, *Erwinia rhapontici*. Продолжительность культивирования для бактерий – 2 суток, для грибов – 7 суток. Биомассу каждой тест-культуры суспендировали, добавляя в пробирки по 5 мл стерильной воды, высевали газоном на чашки со средой соответствующего состава, раскладывали на поверхности питательной среды стерильные диски из фильтровальной

бумаги (ø 5 мм) и наносили на них по 10 мкл жидких культур стрептомицетов. В качестве препаратов сравнения использовали антибиотики с бактерицидным (канамицин, 30 мкг) и антимикотическим действием (тербинафин, 250 мкг). Зоны подавления роста измеряли через 24 часа для бактерий и через 48 часов для грибов. Все тесты проводили в трех повторениях.

Тест-культурой для оценки фиторегуляторного действия штаммов и их бинарных ассоциаций служила пшеница мягкая (*Triticum aestivum* L.) сорта Приокская. Семена замачивали в ЖК бактерий при разведении 10^{-1} и 10^{-2} на 20 час, инкубировали при 28 °С. В контроле использовали семена, замоченные в дистиллированной воде и питательной среде без добавления инокулюма. Обработанные семена проращивали в водно-бумажной рулонной культуре при комнатной температуре (20 ± 2 °С) в течение 6 суток. Учитывали всхожесть, длину корня, высоту побега и сухую биомассу проростков. В каждом варианте теста в рулоны закладывали по 100 семян.

Для статистической обработки данных и построения графиков использовали программу Microsoft Excel. Результаты измерения зон ингибирования стрептомицетами тест-культур бактерий и грибов были визуализированы и подвергнуты кластерному анализу посредством тепловых карт, построенных с помощью веб-сервиса NGCHM-web-builder [16]. В тепловой карте отражены различия в величине зон ингибирования бактериальных и грибных тест-культур изолятами стрептомицетов по отдельности и в бинарных культурах. Столбцы обозначают различные штаммы стрептомицетов и полученные с их участием бинарные культуры. В качестве препарата сравнения использован антибиотик канамицин по отношению к бактериям и тербинафин к грибам.

Результаты и их обсуждение. Высокая активность и продолжительность действия целлюлазных ферментов, антифитопатогенное действие являются важными составляющими комплекса агрономически ценных свойств кандидатных штаммов для создания биопрепаратов почвоулучшающего действия.

³Miller G. L. Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. Analytical Chemistry. 1959;31(3):426-442. DOI: <https://doi.org/10.1021/ac60147a030>

⁴Нетрусов А. И., Егорова М. А., Захарчук Л. М., Динариева Т. Ю. Практикум по микробиологии. М.: Академия, 2005. 608 с. URL: <https://istina.msu.ru/publications/book/3330907/>

Целлюлазная активность. Динамика целлюлазной активности бинарной культуры, полученной на основе штаммов *S. griseoaurantiacus* Мб 4-2 и *S. antimycoticus* 8А13, отличалась от динамики тех же штаммов, выращенных в монокультурах. Пик целлюлазной активности для каждого штамма в отдельности

и при их совместном культивировании приходился на первые сутки инкубации (24 часа). В этот временной период целлюлазная активность бинарной культуры *S. griseoaurantiacus* Мб 4-2 + *S. antimycoticus* 8А13 была в 3,5 раза, а через 48 часов – в 6,5 раза выше, чем в монокультурах (рис. 1)

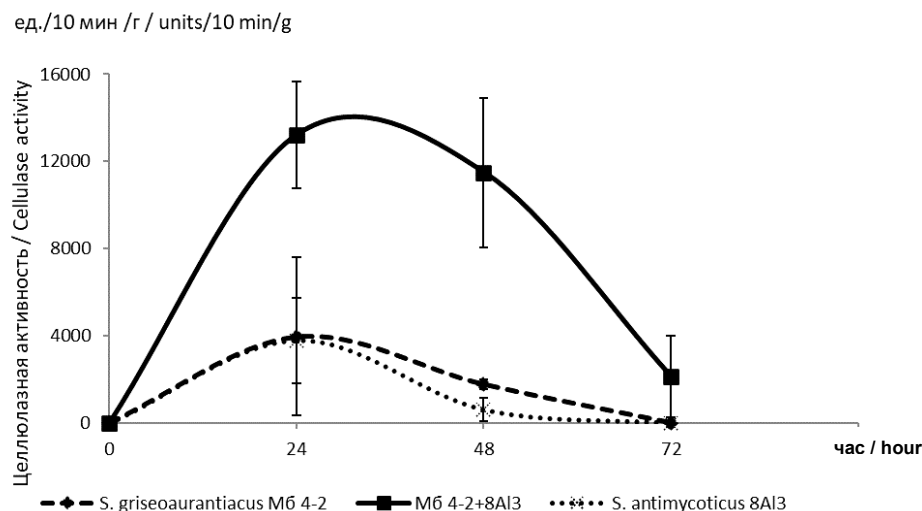


Рис. 1. Динамика целлюлазной активности изолятов *S. griseoaurantiacus* Мб 4-2, *S. antimycoticus* 8А13 в монокультурах и бинарной ассоциации на среде с соломой /

Fig. 1. Dynamics of cellulase activity of isolates *S. griseoaurantiacus* Mb 4-2, *S. antimycoticus* 8A13 in monocultures and in binary association on a medium with straw

В литературе ранее уже отмечалось повышение до двух раз целлюлазной активности *Streptomyces ambofaciens* OZ2 при совместном культивировании с *Cytobacillus oceanisediminis* OZ5 [17]. Также сообщалось о положительных эффектах при совместном культивировании стрептомицетов с грибом *Aspergillus niger*: активность β -глюкозидазы в бинарных культурах была в 3,0-3,5 раза выше по сравнению с монокультурой гриба [18]. Однако данные по стимулирующему влиянию на активность целлюлазы совместного культивирования двух разных видов стрептомицетов в доступной нам литературе ранее не встречались.

В другой бинарной культуре целлюлазная активность при совместном культивировании изолята *S. thermocarboxydus* 1.3 с антагонистически активным штаммом *S. antimycoticus* 8А13 сохранялась на том же уровне, что и в монокультуре (около 6000 ед./10 мин / г). Пик активности штамма 1.3 пришелся на вторые сутки, тогда как в бинарной культуре на основе этих штаммов максимум активности наблюдали уже в первые сутки, но при этом активность сохранялась дольше: к третьим суткам целлю-

лазная активность составила 2587 ед./10 мин / г, активность фермента в монокультуре *S. thermocarboxydus* 1.3 к этому времени снизилась до нуля (рис. 2).

Не отмечено существенного повышения целлюлазной активности и в третьей бинарной ассоциации, полученной на основе штаммов *S. griseoaurantiacus* Мб 4-2 и *Streptomyces* sp. Н 27-25. Целлюлазная активность в этом случае была на треть ниже, чем у штамма *Streptomyces* sp. Н 27-25 (10130 ед./10 мин / г) в монокультуре. Однако совместное культивирование изолятов оказало пролонгирующий эффект, в результате которого целлюлазная активность в данной бинарной культуре через 72 часа в 2,3 раза превышала активность фермента в монокультуре *Streptomyces* sp. Н 27-25 (рис. 3).

Антифитопатогенное действие. Оценка антимикробного действия испытуемых изолятов в отношении бактериальных и грибных фитопатогенов проведена путем регистрации величины зон угнетения их роста в чистых культурах на чашках Петри. Совокупность полученных данных визуализирована в виде тепловых карт, на которых отражены различия

по величине зон ингибирования различных тест-культур (строки) между монокультурами стрептомицетов и полученными на их основе бинарными культурами, в сравнении с ком-

мерческими препаратами – антибиотиками (столбцы). Величина зон ингибирования изменялась от 0 до 25 мм, что отображено на картах цветовым переходом.

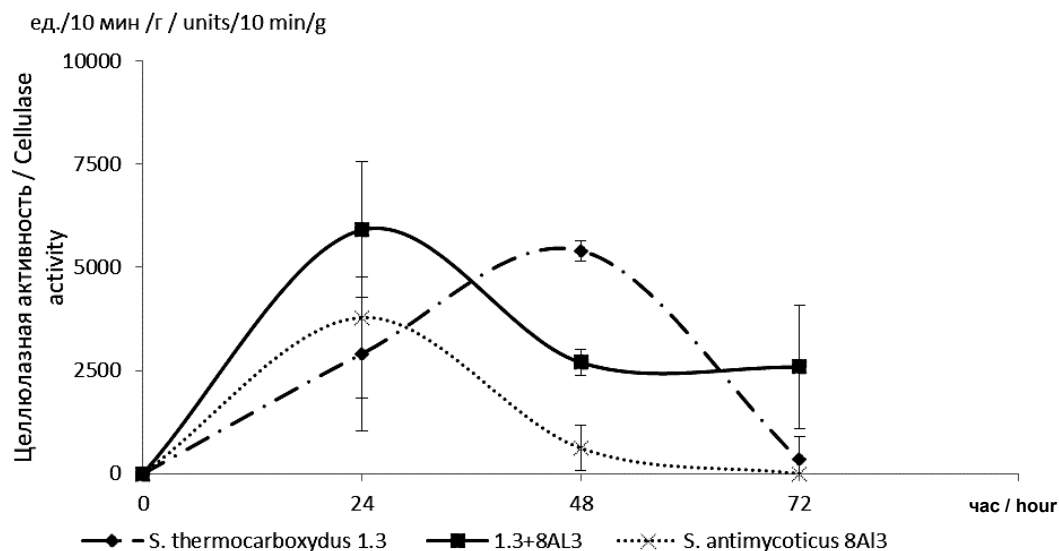


Рис. 2. Изменение целлюлазной активности *S. thermocarboxydus* 1.3, *S. antimycoticus* 8A13 в монокультурах и бинарной ассоциации на среде с соломой /

Fig. 2. Changes in cellulase activity of *S. thermocarboxydus* 1.3, *S. antimycoticus* 8A13 in monocultures and in binary association on a medium with straw

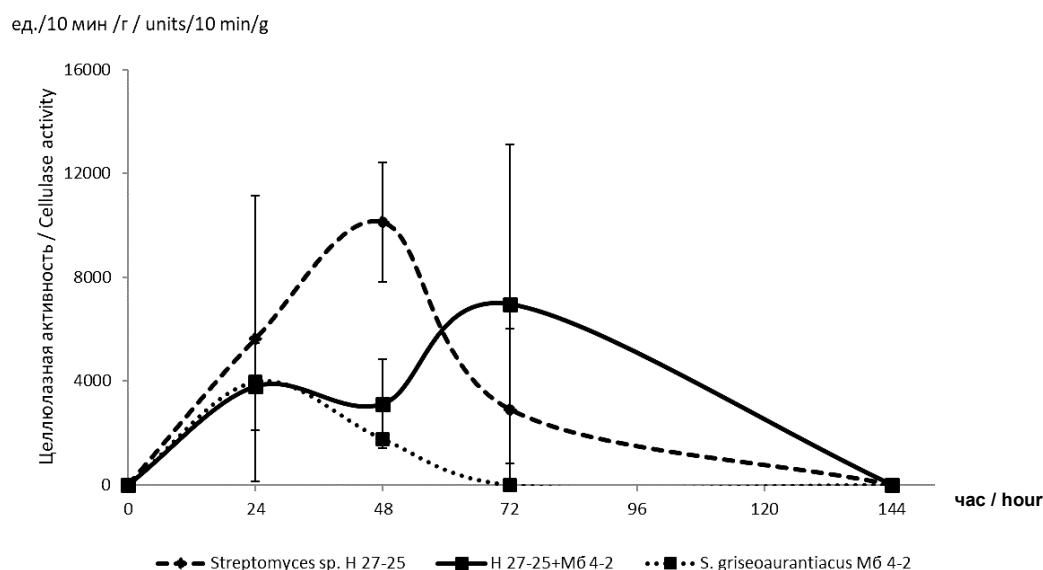


Рис. 3. Изменение целлюлазной активности *Streptomyces* sp. H 27-25 и *S. griseoaurantiacus* Mb 4-2 в монокультурах и бинарной ассоциации на среде с соломой /

Fig. 3. Changes in cellulase activity of *S. griseoaurantiacus* Mb 4-2 and *Streptomyces* sp. H 27-25 in monocultures and in binary association on a medium with straw

При построении тепловой карты все сравниваемые культуры были разделены автоматизированным алгоритмом в отношении тест-бактерий на три кластера (рис. 4). Первый кластер представлен для сравнения препаратом канамицин, который проявил активность

в отношении 4 тест-бактерий, образуя зоны ингибирования диаметром до 25 мм. Все испытуемые штаммы как в монокультурах, так и бинарных культурах достоверно ($P \geq 0,95$) уступали канамицину по своему антибактериальному действию. Более других было

приближено к действию канамицина ингибирующее действие монокультур *S. antimycoticus* 8A13, *Streptomyces* sp. Н 27-25 и бинарной культуры *Streptomyces* sp. Н 27-25 + *S. griseoaurantiacus* Мб 4-2, образовавших второй кластер. Спектр их антагонистической активности тоже включал 4 тест-культуры, а зоны ингибирования не превышали 16 мм. Третий кластер

объединил штаммы-целлюлолитики *S. griseoaurantiacus* Мб 4-2, *S. thermocarboxydus* 1.3 и их бинарные культуры со штаммом *S. antimycoticus* 8A13. Вошедшие в третий кластер культуры стрептомицетов угнетали рост всего 1-2 тест-бактерий, а зоны ингибирования варьировали от 10 до 15 мм.

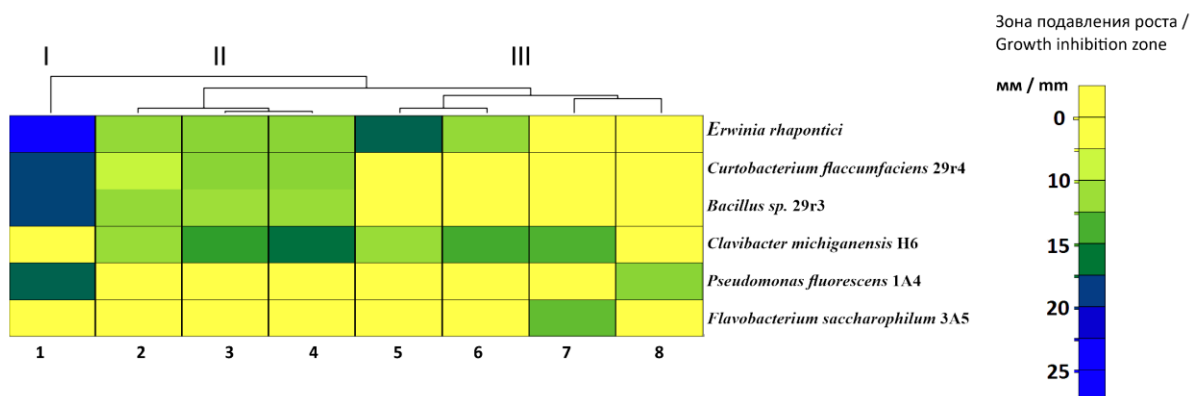


Рис. 4. Тепловая карта, отражающая различия в величине зон ингибирования бактериальных тест-культур изолятами стрептомицетов по отдельности и в бинарных культурах: 1 – канамицин, 2 – *S. antimycoticus* 8A13, 3 – *Streptomyces* sp. Н 27-25, 4 – *Streptomyces* sp. Н 27-25 + *S. griseoaurantiacus* Мб 4-2, 5 – *S. griseoaurantiacus* Мб 4-2 + *S. thermocarboxydus* 1.3, 6 – *S. thermocarboxydus* 1.3 + *S. antimycoticus* 8A13, 7 – *S. griseoaurantiacus* Мб 4-2, 8 – *S. thermocarboxydus* 1.3 /

Fig. 4. Heat map reflecting differences in the size of inhibition zones of bacterial test cultures by streptomycete isolates individually and in binary cultures: 1 – kanamycin, 2 – *S. antimycoticus* 8A13, 3 – *Streptomyces* sp. Н 27-25, 4 – *Streptomyces* sp. Н 27-25 + *S. griseoaurantiacus* Mb 4-2, 5 – *S. griseoaurantiacus* Mb 4-2 + *S. thermocarboxydus* 1.3, 6 – *S. thermocarboxydus* 1.3 + *S. antimycoticus* 8A13, 7 – *S. griseoaurantiacus* Mb 4-2, 8 – *S. thermocarboxydus* 1.3

Из литературы известно, что совместное культивирование стрептомицетов уменьшает антагонизм штаммов по отношению к бактериям [8]. Авторы считают, что это особенность может быть полезна при создании более сложных ассоциаций, в которые, наряду со стрептомицетами, входили бы и другие, например, пробиотические бактерии. По мнению других авторов, совместное культивирование нескольких штаммов микроорганизмов, напротив, может способствовать индукции антагонистической активности в отношении бактерий [19].

Гораздо более выраженным было угнетающее действие совместно культивируемых стрептомицетов в отношении фитопатогенных грибов. Средняя величина зон ингибирования ($18,76 \pm 6,1$ мм) роста тест-культур ассоциацией *S. griseoaurantiacus* Мб 4-2 + *S. thermocarboxydus* 1.3 была сопоставима с таковыми у препарата сравнения – коммерческого антимиотика тербинафина ($19,8 \pm 6,2$ мм). При кластеризации автоматизированным алгоритмом она была объединена в один кластер с тербинафином (рис. 5). Эта бинарная ассоциация подавляла рост всех семи тест-культур грибов,

диаметр зон ингибирования в среднем составил $18,7 \pm 6,1$ мм, что существенно превосходит антифунгальный эффект монокультуры *S. antimycoticus* 8A13 ($11,09 \pm 6,39$ мм), который уже проявил себя в предыдущих исследованиях как перспективный биофунгицид [15]. Примечательно, что оба члена второго кластера были включены в эксперимент как целлюлолитики. Но при совместном культивировании с одним из них (*S. griseoaurantiacus* Мб 4-2) антифунгальное действие штаммов-антагонистов 8A13 и Н 27-25 увеличивалось, а с другим (*S. thermocarboxydus* 1.3), наоборот, снижалось.

Штаммы *S. antimycoticus* 8A13, *Streptomyces* sp. Н 27-25 и бинарные культуры *Streptomyces* sp. Н 27-25 + *S. griseoaurantiacus* Мб 4-2, *S. thermocarboxydus* 1.3 + *S. antimycoticus* 8A13 составили третий кластер на тепловой карте, отражающей различия в ингибировании стрептомицетами грибных фитопатогенов (рис. 5). Спектр их антифунгальной активности включал от 3 до 5 тест-грибов, а зоны ингибирования изменялись от 10 до 22 мм. В третий кластер вошли штаммы *S. griseoaurantiacus* Мб 4-2 и *S. thermocarboxydus* 1.3, не проявившие в монокультурах антифунгального действия.

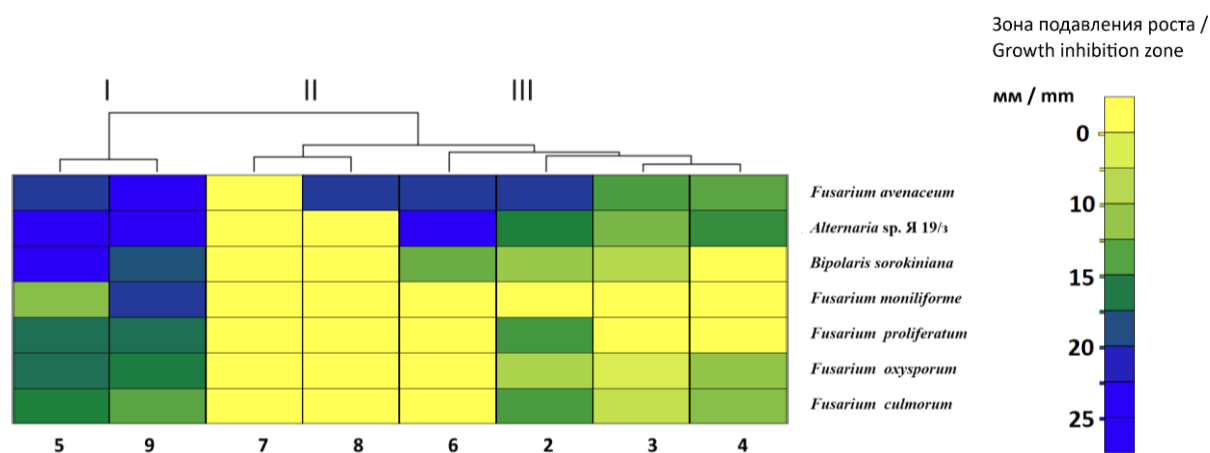


Рис. 5. Тепловая карта, отражающая различия в величине зон ингибирования грибных тест-культур изолятами стрептомицетов по отдельности и в бинарных культурах: 2 – *S. antimycoticus* 8A13, 3 – *Streptomyces* sp. Н 27-25, 4 – *Streptomyces* sp. Н 27-25 + *S. griseoaurantiacus* Мб 4-2, 5 – *S. griseoaurantiacus* Мб 4-2 + *S. thermocarboxydus* 1.3, 6 – *S. thermocarboxydus* 1.3 + *S. antimycoticus* 8A13, 7 – *S. griseoaurantiacus* Мб 4-2, 8 – *S. thermocarboxydus* 1.3, 9 – тербинафин /

Fig. 5. Heat map reflecting differences in the size of inhibition zones of fungal test cultures by streptomycete isolates individually and in binary cultures: 2 – *S. antimycoticus* 8A13, 3 – *Streptomyces* sp. Н 27-25, 4 – *Streptomyces* sp. Н 27-25 + *S. griseoaurantiacus* Mb 4-2, 5 – *S. griseoaurantiacus* Mb 4-2 + *S. thermocarboxydus* 1.3, 6 – *S. thermocarboxydus* 1.3 + *S. antimycoticus* 8A13, 7 – *S. griseoaurantiacus* Mb 4-2, 8 – *S. thermocarboxydus* 1.3, 9 – terbinafine

В литературе сообщалось о стимуляции антагонистической активности стрептомицетов по отношению к грибным фитопатогенам при совместном культивировании [7], такой же эффект наблюдался при совместном культивировании бактерий и грибов [20]. Возможно, это связано с тем, что совместное культивирование, до некоторой степени, имитирует рост и конкурентные условия природной среды [7], и может тем самым приводить к активации некоторых «спящих» генов [3].

Фиторегуляторное действие. Оценивая пригодность стрептомицетов к применению в составе почвоулучшающего препарата, необходима уверенность в отсутствии у кандидатных штаммов токсического действия на растения, так как представители рода *Streptomyces* могут производить вторичные метаболиты, подавляющие рост растений [21, 22]. Фиторегуляторное влияние испытываемых культур оценивали на проростках пшеницы мягкой. Действие монокультур и составленных на их основе бинарных ассоциаций на всхожесть семян, линейные размеры и сухую биомассу проростков в возрасте 6 суток сравнивали с контрольным вариантом, в котором для обработки использовали воду, поскольку существенной разницы между результатами замачивания семян в воде и питательной среде не выявлено. Если по отдельности ЖК *S. griseoaurantiacus* Мб 4-2 и *S. antimycoticus* 8A13

в разведении 10^{-1} стимулировали всхожесть и накопление сухой биомассы проростками, то при сокультивировании обработка семян этими же штаммами, напротив, способствовала снижению всех морфометрических показателей по сравнению с контролем. Но ингибирующее действие бинарной культуры значительно ослаблялось или устранялось при разведении ЖК до 10^{-2} (табл. 2).

Введение штамма 8A13 в состав другой бинарной культуры *S. thermocarboxydus* 1.3 + *S. antimycoticus* 8A13, напротив, нивелировало отрицательное влияние на проростки штамма-целлюлолитика 1.3, проявившееся в монокультуре в отношении морфометрических показателей проростков пшеницы в результате обработки ЖК в разведении 10^{-1} , но устраненное при разведении ЖК до 10^{-2} . Аналогичный синергетический эффект, только менее выраженный, наблюдали и в результате обработки семян третьей бинарной культурой *S. griseoaurantiacus* Мб 4-2 + *Streptomyces* sp. Н 27-25. В ассоциации с антагонистом Н 27-25 штамм-целлюлолитик Мб 4-2 отчасти компенсировал его ингибирующее влияние в разведении 10^{-1} на всхожесть, высоту ростка и сухую биомассу пшеницы. На длину корня данная бинарная культура оказала положительное регуляторное действие в разведении 10^{-2} .

Таблица 2 – Всхожесть и морфометрические показатели проростков пшеницы при обработке семян ЖК стрептомицетов /

Table 2 – Germination and morphometric parameters of wheat seedlings

Вариант / Variant	Всхожесть / Germination	Высота ростка / Sprout height	Длина корня / Root length	Биомасса / Biomass
<i>S. griseoaurantiacus</i> Мб 4-2 + <i>S. antimycoticus</i> 8A13				
Контроль / Control	66,0±12,4 %	70,5±5,9 мм	140,4±9,2 мм	0,233±0,038 г
Мб 4-2 + 8A13, % от К	<u>80,7</u> 96,5	<u>79,8</u> 81,7	<u>84</u> 91,7	<u>79,5</u> 106,3
Мб 4-2, % от К	<u>128,1*</u> 103,5	<u>107,8</u> 107,8	<u>100</u> 93,8	<u>136,6*</u> 103,9
8A13, % от К	<u>141,5*</u> 114,6	<u>107,2</u> 95,57	<u>100</u> 98,4	<u>141,5*</u> 114,6
<i>S. thermocarboxydus</i> 1.3 + <i>S. antimycoticus</i> 8A13				
Контроль / Control	96,0±3,3 %	54,4±5,7 мм	105,7±3,9 мм	0,34±0,02 г
1.3 + 8A13, % от К	<u>102,1</u> 95,8	<u>119,20</u> 106,44	<u>104,73</u> 106,9	<u>106,8</u> 101,5
8A13, % от К	<u>141,5*</u> 114,6	<u>107,2</u> 95,6	<u>100</u> 98,4	<u>141,5*</u> 114,6
1.3, % от К	<u>102,1</u> 99,0	<u>78,78</u> 122,7	<u>88,50</u> 105,5	<u>85,29</u> 108,8
<i>S. griseoaurantiacus</i> Мб 4-2 + <i>Streptomyces</i> sp. Н 27-25				
Контроль / Control	94,0±5,2 %	62,46±7,9 мм	106,6±5,1 мм	0,375±0,03 г
Мб 4-2 + Н 27-25, % от К	<u>102,0</u> 101,1	<u>100</u> 98,9	<u>92,7</u> 105,0	<u>86,6</u> 90,6
Мб 4-2, % от К	<u>128,1*</u> 103,5	<u>107,8</u> 107,8	<u>100</u> 93,8	<u>136,6*</u> 103,9
Н27-25, % от К	<u>77,3</u> 97,3	<u>86,4</u> 96,2	<u>97,8</u> 94,7	<u>77,3</u> 97,3

Примечания: в числителе приведены значения показателей при обработке семян ЖК в разведении 10^{-1} , в знаменателе – в разведении 10^{-2} , * отмечены значения, статистически значимо отличающиеся от контроля (К) – обработки водой, $P \geq 0,95$ /

Notes: above the line are the values of indicators when treating seeds with LC at a dilution of 10^{-1} , below the line – at a dilution of 10^{-2} , * values that are statistically significantly different from the control are marked, $P \geq 0.95$

Таким образом, оценка фиторегуляторной способности природных изолятов и полученных на их основе бинарных ассоциаций не выявила существенного влияния ЖК стрептомицетов на рост и развитие пшеницы мягкой на раннем этапе онтогенеза, что позволяет говорить об отсутствии у данных штаммов фитотоксического эффекта. Наблюдавшееся в отдельных случаях снижение всхожести и отдельных морфометрических показателей может быть устранено путем подбора оптимального разведения ЖК.

Закключение. В ходе работы показано, что совместное культивирование штаммов рода *Streptomyces* может синергетически влиять на уровень целлюлазной и антагонистической активности по отношению к грибным фитопатогенам.

Бинарная культура *S. griseoaurantiacus* Мб 4-2 + *S. antimycoticus* 8A13 проявила более высокую целлюлолитическую и антифунгаль-

ную активность в отношении фитопатогенов, чем входящие в нее штаммы по отдельности. Отсутствие выраженного фитотоксического эффекта позволяет безопасно использовать ее для интродукции в почву и обработки растений. Низкий уровень антагонизма бинарной культуры по отношению к другим бактериям обеспечивает возможность дальнейшей работы с ассоциацией и введения в нее способствующих росту растений PGPR (Plant Growth-Promoting Rhizobacteria) бактерий. Очевидно, что разработка биопрепарата на основе нескольких штаммов стрептомицетов и бактерий, обладающих синергическим действием, – сложный процесс, требующий дальнейших исследований. Однако полученные при тестировании трех бинарных культур результаты вселяют оптимизм и говорят о перспективности получения искусственных ассоциаций стрептомицетов для использования в агротехнологиях.

References

1. Yang J., Hsiang T., Bhadauria V., Xiao-Lin C., Guotian L. Plant Fungal Pathogenesis. BioMed Research International. 2017;(2017):1-2. DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/9724283>
2. Yu Z., Han C., Yu B., Zhao J., Yan Y., Huang S., Liu C., Xiang W. Taxonomic Characterization, and Secondary Metabolite Analysis of *Streptomyces triticiradicis* sp. nov.: A Novel Actinomycete with Antifungal Activity. Microorganisms. 2020;8(1):77. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms8010077>
3. Maglangit F., Fang Q., Kyeremeh K., Sternberg J. M., Ebel R., Deng H. A Co-Culturing Approach Enables Discovery and Biosynthesis of a Bioactive Indole Alkaloid Metabolite. Molecules. 2020;25(2):256. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules25020256>
4. Dong L., Bian X., Zhao Y., Yang H., Xu Y., Han Y., Zhang L. Rhizosphere analysis of field-grown *Panax ginseng* with different degrees of red skin provides the basis for preventing red skin syndrome. BMC Microbiology. 2022;22:12. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12866-021-02430-9>
5. Fang X., Wang H., Zhao L., Wang M., Sun M. Diversity and structure of the rhizosphere microbial communities of wild and cultivated ginseng. BMC Microbiology. 2022;22:2. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12866-021-02421-w>
6. Priyanka J. V., Rajalakshmi S., Senthil Kumar P., Krishnaswamy V. G., Al Farraj D. A., Elshikh M. S., Gawwad M. R. A. Bioremediation of soil contaminated with toxic mixed reactive azo dyes by co-cultured cells of *Enterobacter cloacae* and *Bacillus subtilis*. Environmental Research. 2022;204(Part B):112136. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112136>
7. Li J., Zhang L., Yao G., Zhu L., Lin J., Wang C., Du B., Ding Y., Mei X. Synergistic effect of co-culture rhizosphere *Streptomyces*: A promising strategy to enhance antimicrobial activity and plant growth-promoting function. Front Microbiol. 2022;13:976484. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.976484>
8. Park H. B., Park J. S., Lee S. I., Shin B., Oh D. C., Kwon H. C. Gordonic Acid, a Polyketide Glycoside Derived from Bacterial Coculture of *Streptomyces* and *Gordonia Species*. Journal of Natural Products. 2017;80(9):2542-2546. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jnatprod.7b00293>
9. Sinjaroonsak S., Chaiyaso T., H-Kittikun A. Optimization of Cellulase and Xylanase Productions by *Streptomyces thermocoprophilus* TC13W Using Low Cost Pretreated Oil Palm Empty Fruit Bunch. Applied Biochemistry and Biotechnology. 2019;189(1):76-86. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12010-019-02986-3>
10. Celaya-Herrera S., Casados-Vázquez L. E., Valdez-Vázquez I., Barona-Gómez F., Bideshi D. K., Barboza-Corona J. E. A Cellulolytic *Streptomyces* Sp. Isolated from a Highly Oligotrophic Niche Shows Potential for Hydrolyzing Agricultural Wastes. BioEnergy Research. 2021;14(5):333-343. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12155-020-10174-z>
11. Baltz R. H. Genetic manipulation of secondary metabolite biosynthesis for improved production in *Streptomyces* and other actinomycetes. Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology. 2016;43(2-3):343-370. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10295-015-1682-x>
12. Makitrynsky R., Tsyplik O., Bechthold A. Genetic Engineering of *Streptomyces ghanaensis* ATCC14672 for Improved Production of Moenomycins. Microorganisms. 2022;10(1):30. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms10010030>
13. Боков Н. А., Назарова Я. И., Широких И. Г. Изменение целлюлазной активности стрептомицетов в зависимости от продолжительности культивирования. Экология родного края: проблемы и пути их решения: мат-лы XVII Всеросс. научн.-практ. конф. с междунар. участием. Киров: Вятский государственный университет, 2022. С. 15-19. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49235975> EDN: NUSQPC
14. Bokov N. A., Nazarova Ya. I., Shirokikh I. G. Changes in cellulase activity of streptomycetes depending on the duration of cultivation. Ecology of the native land: problems and ways to solve them: Proceedings of the XVII All-Russian scientific-practical conf. with international participation. Kirov: *Vyatskiy gosudarstvennyy universitet*, 2022. pp. 15-19. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49235975>
15. Боков Н. А., Широких И. Г. Оценка фиторегуляторной активности стрептомицетов-целлюлозолитиков. Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем: мат-лы XX Всеросс. научн.-практ. конф. с междунар. участием. Киров: Вятский государственный университет, 2022. С. 203-207. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49950177> EDN: SVQIHV
16. Bokov N. A., Shirokikh I. G. Assessment of phyto regulatory activity of cellulolytic streptomycetes. Biodiagnostics of the state of natural and natural-technogenic systems: Proceedings of the XX All-Russian scientific and practical conference with international participation. Kirov: *Vyatskiy gosudarstvennyy universitet*, 2022. pp. 203-207. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49950177>
17. Широких И. Г., Назарова Я. И., Бакулина А. В., Абубакирова Р. И. Новые штаммы стрептомицетов как перспективные биофунгициды. Теоретическая и прикладная экология. 2021;(1):172-180. DOI: <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2021-1-172-180> EDN: SUHXUY
18. Shirokikh I. G., Nazarova Ya. I., Bakulina A. V., Abubakirova R. I. New streptomycetes strains as promising biofungicides. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya* = Theoretical and Applied Ecology. 2021;(1):172-180. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2021-1-172-180>

16. Ryan M. C., Stucky M., Wakefield C., Melott J. M., Akbani R., Weinstein J. N., Broom B. M. Interactive Clustered Heat Map Builder: An easy web-based tool for creating sophisticated clustered heat maps. *F1000Research*. 2019;(8):1750. DOI: <https://doi.org/10.12688/f1000research.20590.2>
17. Baltaci M. O. Enhancement of cellulase production by co-culture of *Streptomyces ambofaciens* OZ2 and *Cytobacillus oceanisediminis* OZ5 isolated from rumen samples. *Biocatalysis and Biotransformation*. 2022;40(2):144-152. DOI: <https://doi.org/10.1080/10242422.2022.2038581>
18. Detain J., Rémond C., Rodrigues C. M., Harakat D., Besaury L. Co-elicitation of lignocellulolytic enzymatic activities and metabolites production in an *Aspergillus-Streptomyces* co-culture during lignocellulose fractionation. *Current Research in Microbial Sciences*. 2022;3:100108. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2022.100108>
19. Ueda K., Beppu T. Antibiotics in microbial coculture. *The Journal of Antibiotics*. 2017;(70):361-365. DOI: <https://doi.org/10.1038/ja.2016.127>
20. Octarya Z., Nugroho T. T., Nurulita Y., Suraya N., Saryono. Production of antifungal compounds from *Bacillus paramycoides* LBKURCC218 and *Aspergillus fumigatus* LBKURCC269 co-cultivation. *Materials Today: Proceedings*. 2023;87(2):120-125. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.382>
21. Широких И. Г., Комлева А. В. Выделение и характеристика нового штамма стрептомицета-продуцента боррелидина. Экология родного края: проблемы и пути их решения: мат-лы XVII Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Т. Кн. 2. Киров: Вятский государственный университет, 2022. С. 10-15. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49235974> EDN: DVXSFB
- Shirokikh I. G., Komleva A. V. Isolation and characteristics of a new borrelidin-producing streptomycete strain. Ecology of the native land: problems and ways to solve them: Proceedings of the XVII All-Russian. scientific-practical conf. with international Participation. T. Book 2. Kirov: *Vyatskiy gosudarstvennyy universitet*, 2022. pp. 10-15. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49235974>
22. Куликова Н. А. Получение и масштабы применения гербицидов: история и современные тенденции. Проблемы агрохимии и экологии. 2020;(2):52-68. DOI: <https://doi.org/10.26178/AE.2020.2019.4.016> EDN: IUESEN
- Kulikova N. A. Herbicides synthesis and usage: history and current trends. *Problemy agrokhimii i ekologii*. 2020;(2):52-68. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.26178/AE.2020.2019.4.016>

Сведения об авторах

✉ **Боков Никита Александрович**, аспирант, младший научный сотрудник, ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого», ул. Ленина 166а, г. Киров, Российская Федерация, 610007, e-mail: priemnaya@fanc-sv.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1000-1192>, e-mail: nikita-bokov@mail.ru

Абубакирова Роза Ильдусовна, лаборант-исследователь, ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого», ул. Ленина 166а, г. Киров, Российская Федерация, 610007, e-mail: priemnaya@fanc-sv.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8526-2733>

Широких Ирина Геннадьевна, доктор биол. наук, главный научный сотрудник, зав. лабораторией, ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого», д. 166а, ул. Ленина, г. Киров, Российская Федерация, 610007, e-mail: priemnaya@fanc-sv.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3319-2729>

Information about the authors

✉ **Nikita A. Bokov**, graduate student, junior researcher, 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/0000-0002-1000-1192>, e-mail: nikita-bokov@mail.ru

Roza I. Abubakirova, laboratory researcher, Federal State Budgetary Institution 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/0000-0002-8526-2733>

Irina G. Shirokikh, DSc in Biological Science, chief researcher, Head of the Laboratory, Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky, Lenin str., 166a, Kirov, Russian Federation, 610007, email: priemnaya@fanc-sv.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3319-2729>

✉ – Для контактов / Corresponding author

<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.5.810-819>

УДК 631.8:631.452:635.65:633.49

Изменение продуктивности севооборота и устойчивости агроценозов при длительном применении удобрений

© 2023. Е. И. Золкина ✉

Всероссийский научно-исследовательский институт органических удобрений и торфа – филиал ФГБНУ «Верхневолжский федеральный аграрный центр»,
Владимирская область, Российская Федерация

В статье рассмотрены результаты многолетнего полевого опыта (1968-2018 гг.), проведенного в Центральной части Нечерноземной зоны России (Владимирская область) на протяжении 11 ротаций четырёхпольного зерно-пропашного севооборота. В работе показано влияние органических и минеральных удобрений, используемых в различных сочетаниях и дозах, на урожайность культур севооборота, плодородие дерново-подзолистого супесчаной почвы. Установлено, что более высокую продуктивность севооборота в опыте получили при использовании органо-минеральной системы удобрения (навоз 10 т/га + $N_{50}P_{25}K_{60}$) (в среднем за одиннадцать ротаций) на уровне 39,9 ц з. е./га, или на 79,7 % выше контроля без удобрений. Минеральная система удобрения при средних дозах удобрений ($N_{50}P_{25}K_{60}$) по эффективности была на уровне органо-минеральной, органическая система уступала минеральной как при средних дозах (навоз 10 т/га), так и при повышенных (навоз 20 т/га). При этом длительное использование органических удобрений обеспечило увеличение содержания гумуса в зависимости от дозы подстилочного навоза на 16-36 % по сравнению с исходными значениями. Использование органических удобрений привело к стабилизации содержания в почве доступных форм калия на среднем и повышенном уровнях обеспеченности. Стабилизация содержания подвижного фосфора в почве на уровне средней обеспеченности отмечена соответственно при минеральной, органо-минеральной и органической системах удобрения с низкими и средними дозами. При повышенных дозах наблюдали дальнейшее увеличение содержания биогенных веществ в почве. Возделывание полевых культур в севообороте без применения органических и минеральных удобрений привело к снижению продуктивности. Наибольшую устойчивость урожайности сельскохозяйственных культур по годам исследования получили в вариантах с внесением различных видов удобрений по сравнению с вариантом без удобрений. Почва в вариантах с органической (навоз 20 т/га) и органо-минеральной (навоз 10 т/га + $N_{50}P_{25}K_{60}$) системами удобрения характеризовалась высокими значениями основных физиологических групп микроорганизмов, величина соотношения численности амилотических и протеолитических микроорганизмов составила 1,1-1,2, что свидетельствует о сбалансированности процессов минерализации и гумификации органического вещества в почве.

Ключевые слова: севооборот, длительный полевой опыт, органические и минеральные удобрения, агроценоз, плодородие, микробиологическая активность

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Верхневолжский федеральный аграрный центр» (FGNW – 2022 - 0001).

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

Конфликт интересов: автор заявил об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Золкина Е. И. Изменение продуктивности севооборота и устойчивости агроценозов при длительном применении удобрений. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2023;24(5):810-819.

DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.5.810-819>

Поступила: 07.04.2023

Принята к публикации: 26.09.2023

Опубликована онлайн: 30.10.2023

Changes in crop rotation productivity and stability of agrocenoses with prolonged use of fertilizers

© 2023. Ekaterina I. Zolkina ✉

All-Russian Research Institute of Organic Fertilizers and Peat – branch
of the Verkhnevolzhsky Federal Agrarian Center, Vladimir Region, Russian Federation

The article considers the results of many years of field experiment (1968-2018) conducted in the Central part of the Non-Chernozem zone of Russia (Vladimir region). The research was carried out during eleven rotations of the four-field grain crop rotation. The study shows the effect of use of organic and mineral fertilizers applied in various doses and combinations on crop rotation yield, fertility of sod-podzolic sandy loam soil. It was found that the organomineral fertilizer system (manure

10 t/ha + N₅₀P₂₅K₆₀) provided stable crop rotation productivity (on average for eleven rotations) at the level of 39.9 c. e./ha, or 79.7 % higher than the control without fertilizers. The mineral fertilizer system at medium doses of fertilizers (N₅₀P₂₅K₆₀) was at the level of the organomineral system. The organic system was inferior in efficiency to the mineral system, both at medium doses (manure 10 t/ha) and at elevated doses (manure 20 t/ha). At the same time, the long-term use of organic fertilizers provided an increase in the humus content, depending on the dose of litter manure, by 16-36 % compared to the initial values. The use of organic fertilizers led to the stabilization of the content of available forms of potassium in the soil at an average and elevated level, respectively. Stabilization of the content of mobile phosphorus in the soil at the level of average supply was noted in mineral, organomineral and organic fertilizer systems, respectively, with low and medium doses. When using increased doses of fertilizers, there is a further increase in the content of nutrients in the soil. Growing crops in crop rotation without the use of organic and mineral fertilizers gradually led to a decrease in yield. The use of fertilizers provided greater stability of crop yields over the years of the study compared to the variant without fertilizers. The soil in the variants with organic (manure 20 t/ha) and organomineral (manure 10 t/ha + N₅₀P₂₅K₆₀) fertilizer systems was characterized by high values of the main physiological groups of microorganisms. The ratio of the number of amylolytic and proteolytic microorganisms was 1.1-1.2, that indicated a balance in the processes of mineralization of organic matter in the soil and its humification.

Keywords: crop rotation, long-term field experiment, organic and mineral fertilizers, agrocenosis, fertility, microbiological activity

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 Verkhnevolzhsky Federal Agrarian Center (FGNW – 2022-0001).

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

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

For citation: Zolkina E. I. Changes in crop rotation productivity and stability of agrocenoses with prolonged use of fertilizers. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2023;24(5):810-819. (In Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.5.810-819>

Received: 07.04.2023

Accepted for publication: 26.09.2023

Published online: 30.10.2023

Воспроизводство плодородия почв является важнейшей задачей современного земледелия [1]. В длительных опытах применение органических и минеральных удобрений приводит к постепенному повышению эффективного и потенциального плодородия почвы. При этом происходит стабилизация основных показателей почвенного плодородия на новых уровнях, соответствующих поступлению органического вещества и элементов минерального питания с удобрениями, растительными остатками и отчуждению их с урожаем. Направленность и степень влияния существенно зависит от возделываемых культур [2], разновидности почв, доз применяемых удобрений, погодных особенностей региона [3, 4, 5].

Окультурирование почв при длительном применении удобрений в комплексе с необходимыми приемами агротехники повышает общую продуктивность севооборотов в агроценозах [6, 7, 8], обеспечивает возможность мониторинга органического вещества почвы и круговорота питательных веществ в агросистеме [9].

Одной из основных проблем при разработке систем применения удобрений являются проведение их сравнительной оценки и определение оптимального соотношения органических и минеральных удобрений в севооборотах различной специализации. На основе данных 44 отечественных и зарубежных опытов (105 ротаций) показано, что прибавка урожая от сочетания половинных доз навоза и минеральных

удобрений по сравнению с отдельным внесением составляет с 1 га 1,2 ц з. е., или 11 %, в том числе на легких дерново-подзолистых почвах 1,9 ц з. е. (23 %), тяжело- и среднесуглинистых – 1,2 (8 %), черноземах – 0,4 ц з. е. (5 %) [10].

Важным показателем уровня плодородия почв является содержание органического вещества и его специфической части – гумуса, определяющей структуру почв, водно-воздушный и питательный режимы. Именно гумус коррелирует с биологическими показателями почвы и подтверждает представление о том, что накопление органического вещества и сопряженное с ним повышение биологической активности почвы являются единым процессом трансформации органического вещества [11, 12].

Цель исследований – изучить изменения продуктивности культур севооборота и устойчивости агроценозов при длительном применении органических и минеральных удобрений на дерново-подзолистой почве в условиях Владимирской области.

Научная новизна – получение экспериментальных данных по влиянию длительного (1968-2018 гг.) применения различных систем удобрения на продуктивность культур зерно-пропашного севооборота и устойчивость агроценозов, агрохимические и биологические свойства дерново-подзолистой супесчаной почвы.

Материал и методы. Исследования проводили в длительном стационарном опыте Всероссийского НИИ органических удобрений и торфа, заложенном в 1968 г. по общепринятым

методикам¹. Чередование культур в зерно-пропашном севообороте: однолетний люпин – озимая пшеница – картофель – ячмень. Географические координаты участка: 56°03′ северной широты, 40°29′ восточной долготы. Повторность опыта – четырехкратная в пространстве и двукратная во времени. Размер делянки 161 м².

Опыт заложен на дерново-подзолистой супесчаной почве с исходными агрохимическими показателями: рН_{KCl} – 6,2-6,5; гидролитическая кислотность – 1,0-2,2 мг-экв/100 г; гумус – 1,05-1,17 %; подвижный фосфор – 14-25 мг/кг почвы; обменный калий – 63-104 мг/кг почвы.

Схема стационарного опыта предусматривала изучение эффективности органической, минеральной и органо-минеральной систем удобрения при различных уровнях удобрённости. В данной работе сравнивали отдельные варианты систем удобрения, в том числе выравненные по количеству питательных веществ: 1. Без удобрений. 2. Навоз 10 т/га. 3. Навоз 20 т/га. 4. N₅₀P₂₅K₆₀. 5. Навоз 5 т/га + N₂₅P₁₂K₃₀. 6. Навоз 10 т/га + N₅₀P₂₅K₆₀. 7. N₁₀₀P₅₀K₁₂₀. 8. Навоз 10 т/га + N₁₀₀P₅₀K₁₂₀. Ежегодные дозы удобрений в вариантах с органической, органо-минеральной и минеральной системами удобрения по культурам представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Распределение удобрений по культурам севооборота (подстильный навоз, т/га; минеральные удобрения, д. в. кг/га)/

Table 1 – Distribution of fertilizers by crops in crop rotation (plant manure, t/ha, mineral fertilizers, a. i. kg/ha)

№ варианта / No. of variant	Вид удобрений / Types of fertilizers	Люпин / Lupin	Озимая пшеница / Winter wheat	Картофель / Potato	Ячмень / Barley	Всего за ротацию / Total per rotation	
						сумма / the amount	среднегодовая / average annual
1	Без удобрений / Without fertilizers	-	-	-	-	-	-
2	Навоз подстильный / Plant manure	-	20	20	-	40	10
3	Навоз подстильный / Plant manure	-	40	40	-	80	20
4	N	-	60	80	60	200	50
	P ₂ O ₅	-	30	40	30	100	25
	K ₂ O	-	60	120	60	240	60
5	N	-	30	40	30	100	25
	P ₂ O ₅	-	10	25	15	50	12
	K ₂ O	-	30	60	30	120	30
	Навоз подстильный / Plant manure	-	20	-	-	20	5
6	N	-	60	80	60	200	50
	P ₂ O ₅	-	30	40	30	100	25
	K ₂ O	-	60	120	60	240	60
	Навоз подстильный / Plant manure	-	20	20	-	40	10
7	N	-	120	160	120	400	100
	P ₂ O ₅	-	60	80	60	200	50
	K ₂ O	-	120	240	120	480	120
8	N	-	120	160	120	400	100
	P ₂ O ₅	-	60	80	60	200	50
	K ₂ O	-	120	240	120	480	120
	Навоз подстильный / Plant manure	-	20	20	-	40	10

Примечание: варианты 2, 4, 5 и 3, 6, 7 выравнены по количеству основных питательных веществ, эквивалентны дозам навоза 10 и 20 т/га соответственно /

Note: variants 2, 4, 5 and 3, 6, 7 are aligned according to the amount of nutrients in doses equivalent to manure doses of 10 and 20 t/ha, respectively

¹Доспехов Б. А. Методика полевого опыта. М., 1985. 351 с.; Методические указания по проведению исследований в длительных опытах с удобрениями. Ч. 1. М., 1986. С. 106-114.

Анализ химических и физико-химических свойств почвы проводили по следующим методикам: содержание органического вещества (ГОСТ 26213-91), обменную кислотность pH_{KCl} – потенциометрическим методом (ГОСТ 26483-85), подвижные формы фосфора и калия – по Кирсанову (ГОСТ 26207-91), гумус – по Тюрину.

При оценке биологических свойств почвы использовали следующие показатели: численность основных физиологических групп микроорганизмов (ФГМ) – методом учета на плотных и жидких питательных средах²; соотношение численности амилотических и протеолитических микроорганизмов – КАА/МПА³. Величина этого соотношения показывает направленность в почве процессов трансформации органического вещества: преобладание процессов минерализации или синтеза гумусовых веществ.

Полученные в опыте данные обработаны методом дисперсионного анализа⁴ с использованием прикладной программы в MS DOS.

В таблицах представлены средние значения определяемых показателей в образцах из пахотного слоя почвы (0-20 см) в 2-кратной повторности в два срока – весной до внесения удобрений и в середине вегетации.

Результаты и их обсуждение. Продуктивность севооборота является одним из основных показателей, определяющих эффективность различных систем удобрения. Исследования показали, что применение удобрений способствовало существенному увеличению продуктивности севооборота (табл. 2). В период проведения исследования (1968-2018 гг.) среднегодовая продуктивность севооборота с учетом побочной продукции за одиннадцать ротаций (в течение 50 лет) составила без внесения удобрений 22,2 ц з. е./га. При этом величина урожая зависела от вида удобрений, их сочетаний и вносимых доз. Наибольшая среднегодовая продуктивность севооборота – 41,5 ц з. е./га в опыте была достигнута при действии органо-минеральной системы удобрения при повышенных дозах (навоз 10 т/га + $N_{100}P_{50}K_{120}$), где прибавка к контролю составила 19,3 ц з. е./га, или 87 % от контроля. При использовании органических систем удобрения продуктивность севооборота в среднем за все ротации оказалась ниже органо-минеральной на 4,1-6,2 ц з. е./га. По сравнению с минеральными системами эффективность органических систем удобрения была ниже на 5,2-5,3 ц з. е./га.

Таблица 2 – Влияние различных систем удобрения на продуктивность* зернопропашного севооборота, ц з. е./га (1968-2018 гг.) /

Table 2 – The influence of various fertilizer systems on crop rotation productivity*, c.e./ha (1968-2018)

Вариант опыта / Variant of the experiment	Ротация севооборота / Rotation of crop rotation						В среднем за 11 ротаций, ц з. е./га / On average, c.e./ha	Окупаемость 1 кг д. в. удобрений, кг з. е. / Payback of 1 kg of mineral fertilizers, kg of grain c.e.
	1	3	5	7	9	11		
Без удобрений / Without fertilizers	30,3	24,9	28,5	16,3	21,3	17,3	22,2	-
Навоз 10 т/га / Manure 10 t/ha	37,9	35,2	33,7	22,0	31,3	24,4	30,1	6,4
Навоз 20 т/га / Manure 20 t/ha	41,1	39,3	35,9	24,7	35,8	26,5	33,7	4,1
$N_{50}P_{25}K_{60}$	38,3	37,2	39,9	24,3	38,8	31,7	35,4	9,8
Навоз 5 т/га + $N_{25}P_{12}K_{30}$ / Manure 5 t/ha + $N_{25}P_{12}K_{30}$	40,0	36,6	37,8	24,9	36,5	28,3	34,2	9,0
Навоз 10 т/га + $N_{50}P_{25}K_{60}$ / Manure 10 t/ha + $N_{50}P_{25}K_{60}$	42,4	44,1	43,5	28,1	47,5	31,1	39,9	6,5
$N_{100}P_{50}K_{120}$	39,1	43,0	42,1	27,0	46,1	32,0	38,9	6,2
Навоз 10 т/га + $N_{100}P_{50}K_{120}$ / Manure 10 t/ha + $N_{100}P_{50}K_{120}$	42,6	44,7	46,1	29,5	50,3	34,2	41,5	5,3
HCP ₀₅ / LSD ₀₅	-	-	-	-	-	-	5,5	-

*С учетом побочной продукции / *Taking into account by-products

²Теппер Е. З., Шильникова В. К., Переверзева Г. И. Практикум по микробиологии. М.: Агропромиздат, 1987. 239 С.

³Кирюшин В. И. Агрономическое почвоведение. М.: Колос С, 2010. С.126-128.

⁴Доспехов Б. А. Указ. соч.

Эффективность органоминеральной и минеральной систем удобрения была на одном уровне. Продуктивность севооборота в этих системах удобрения при использовании средних доз повысилась на 12,0-13,2 ц з. е./га, повышенных – на 16,7-17,7 ц з. е./га, окупаемость 1 кг действующего вещества удобрений составила 9,0-9,8 и 6,2-6,5 кг з. е. соответственно.

Об устойчивости агроценозов при оптимизации систем удобрения свидетельствуют данные, полученные при сравнительном анализе продуктивности зернопропашного севооборота за одиннадцать ротаций. Оценка динамики

изменения продуктивности севооборота по годам исследования показала, что максимальная продуктивность отмечена в первых ротациях опыта, независимо от варианта. Установлено, что за годы исследования в варианте без удобрений произошло постепенное и значительное снижение продуктивности севооборота с 30,3 до 17,3 ц з. е./га. Рассмотрение влияния отдельных систем удобрения по ротациям показало, что поддержанию исходного уровня продуктивности способствовало применение минеральной ($N_{100}P_{50}K_{120}$) и органоминеральной (Навоз 10 т/га + $N_{50}P_{25}K_{60}$) систем (рис. 1).

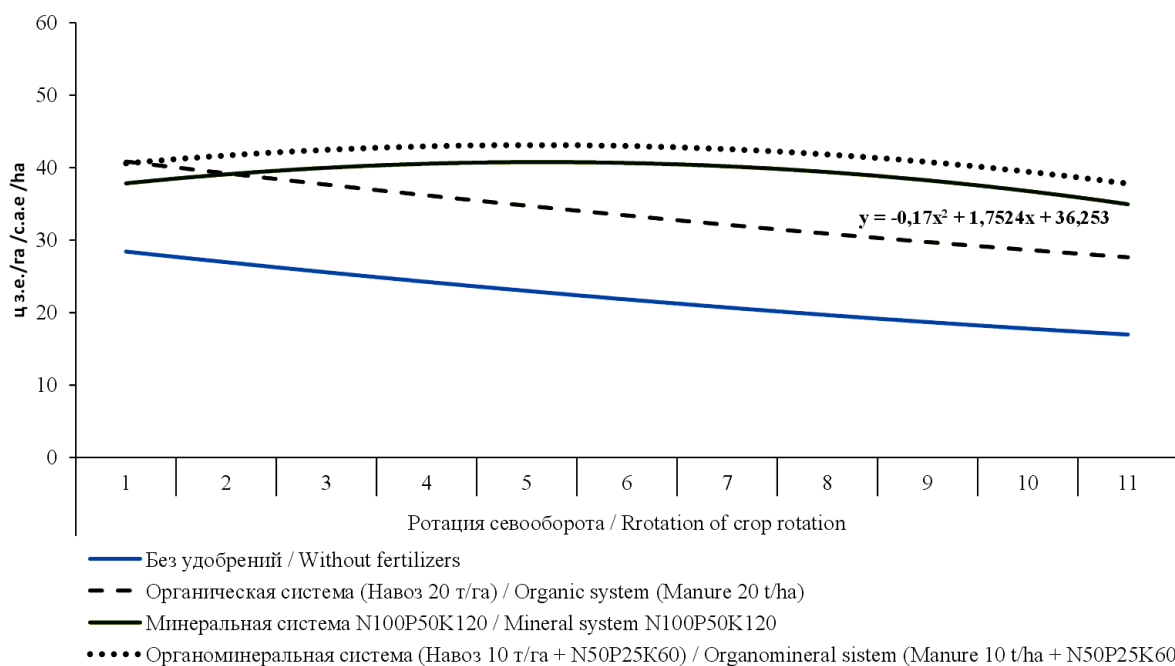


Рис. 1. Изменение продуктивности севооборота при длительном применении различных систем удобрения (1968-2018 гг.) /

Fig. 1. Changes in crop rotation productivity with prolonged use of various fertilizer systems (1968-2018)

При использовании органической системы в дозе 20 т/га, эквивалентной минеральной в дозе $N_{100}P_{50}K_{120}$, отмечено снижение продуктивности с 41,1 до 26,5 ц з. е./га. При внесении средних доз удобрений снижение продуктивности отмечено при использовании всех систем удобрения, особенно органической.

Более стабильная продуктивность севооборота получена на минеральной и органоминеральных системах с внесением как средних, так и повышенных доз удобрений. При использовании органической системы удобрения продуктивность севооборота стабильно снижалась с течением времени, что связано с засорённостью почвы и посевов в этом варианте. В наших исследованиях, проведенных в 11-й ротации зернопропашного севооборота,

в вариантах с органической системой удобрения засорённость однолетнего люпина увеличилась в 2,4-2,7 раза, озимой пшеницы – в 1,3-1,5, картофеля – в 1,7-1,9, ячменя – в 2,2-2,8 раза по сравнению с минеральной системой удобрения.

Полученные экспериментальные данные в длительном стационарном опыте за 11 ротаций зернопропашного севооборота показали, что с течением времени эффективность систем удобрения изменяется.

Данные по влиянию различных систем удобрения на урожайность сельскохозяйственных культур представлены в таблице 3. Урожайность зеленой массы однолетнего люпина в варианте без удобрений составила 19,6 т/га, а с внесением удобрений она возросла

на 17-23 %. Эффективность как органических, так и минеральных удобрений, внесенных под озимую пшеницу, получена значительно выше (урожайность на 37-58 % выше контроля). Следует отметить, что урожайность пшеницы

при использовании $N_{50}P_{25}K_{60}$ на фоне среднегодовой дозы навоза 10 т/га составила 3,0 т/га, удвоение дозы минеральных удобрений на фоне 10 т/га навоза не сопровождалось ее ростом (табл. 3).

Таблица 3 – Влияние различных систем удобрения на урожайность сельскохозяйственных культур, т/га (в среднем за 11 лет возделывания) /

Table 3 – The influence of various fertilizer systems on crop yields, t/ha (on average for 1968-2018)

<i>Вариант опыта / Variant of the experiment</i>	<i>Однолетний люпин, зел. масса / Annual lupin, s.m.</i>	<i>Озимая пшеница / Winter wheat</i>	<i>Картофель / Potato</i>	<i>Ячмень / Barley</i>
Без удобрений / Without fertilizers	19,6	1,9	10,0	1,1
Навоз 10 т/га / Manure 10 t/ha	22,0	2,6	14,9	1,7
Навоз 20 т/га / Manure 20 t/ha	22,9	2,9	17,3	2,1
$N_{50}P_{25}K_{60}$	22,5	2,9	17,6	2,5
Навоз 5 т/га + $N_{25}P_{12}K_{30}$ / Manure 5 t/ha + $N_{25}P_{12}K_{30}$	22,6	2,9	17,1	2,3
Навоз 10 т/га + $N_{50}P_{25}K_{60}$ / Manure 10 t/ha + $N_{50}P_{25}K_{60}$	23,6	3,0	21,5	2,9
$N_{100}P_{50}K_{120}$	24,1	2,9	20,4	2,8
Навоз 10 т/га + $N_{100}P_{50}K_{120}$ / Manure 10 t/ha + $N_{100}P_{50}K_{120}$	25,1	3,0	22,8	2,9
HCP ₀₅ / LSD ₀₅	3,1	0,3	3,0	0,4

Применение удобрений было высокоэффективным также на картофеле, где при использовании органоминеральной системы удобрения с повышенными дозами урожайность составила 21,5 т/га, или 115 % к варианту без удобрений. Использование высокой дозы удобрений (навоз 10 т/га + $N_{100}P_{50}K_{120}$) способствовало росту урожайности до 22,8 т/га (на 128 %). Из всех изученных культур наиболее высокой отзывчивостью на удобрения отличался ячмень. При внесении удобрений в дозе $N_{50}P_{25}K_{60}$ урожайность составила 2,5 т/га, или 127 % к контролю. Использование этой дозы на фоне навоза 10 т/га обеспечило увеличение урожайности до 2,8 т/га, или на 164 % к варианту без удобрений.

Изменение агрохимических показателей почвы показало, что по завершению одиннадцатой ротации севооборота (2018 г.), по сравнению с первоначальными данными (1968 г.), обменная кислотность почвы в варианте без удобрений снизилась на 1,02 единицы pH, при внесении одних минеральных удобрений $N_{50-100}P_{25-50}K_{60-120}$ на 1,03-1,54 соответственно дозам (табл. 4).

Применение различных систем удобрения на протяжении 11 ротаций севооборота улучшало гумусное состояние почвы, за исключением вариантов с использованием средних доз удобрений. При использовании полного минерального

удобрения в повышенных дозах ($N_{100}P_{50}K_{120}$) наблюдалась стабилизация содержания гумуса на уровне 1,08 %. Длительное внесение органических удобрений увеличило содержание гумуса в почве на 0,17-0,39 абс.% в зависимости от дозы подстильного навоза. При органоминеральной системе с повышенными (навоз 10 т/га + $N_{50}P_{25}K_{60}$) и высокими (навоз 10 т/га + $N_{100}P_{50}K_{120}$) дозами удобрений содержание гумуса в почве возросло на 0,17-0,18 абс.% соответственно. За 11 ротаций севооборота максимальное снижение гумусированности почв отмечено в варианте без удобрений.

Исходная обеспеченность почвы подвижными формами фосфатов была очень низкой. Содержание подвижного фосфора в почве без применения удобрений по завершению 11-й ротации севооборота практически не изменилось по сравнению с исходным значением. Стабилизация содержания подвижного фосфора в почве на уровне средней обеспеченности (51-57-72 мг/кг) отмечена соответственно при минеральной, органоминеральной и органической системах удобрения с низкими и средними дозами. При внесении более высоких доз минеральных и органических удобрений содержание фосфора в почве увеличилось до 109-156 мг/кг (повышенный и высокий уровни обеспеченности).

Таблица 4 – Изменение агрохимических свойств почвы при длительном применении удобрений в зернопропашном севообороте /
Table 4 – Changes in the agrochemical properties of the soil with prolonged use of fertilizers in the grain crop rotation

Вариант / Variant	Кислотность, pH _{KCl} / Soil acidity, pH _{KCl}			Гумус, % / Humus, %			Подвижный фосфор / Mobile phosphorus				Обменный калий / Exchangeable potassium			
							мг/кг / mg/kg							
	1968 г. *	2018 г. **	изменение за 1968-2018 гг. / change in 1968-2018	1968 г. *	2018 г. **	изменение за 1968-2018 гг. / change in 1968-2018	1968 г. *	2018 г. **	изменение за 1968-2018 гг. / change in 1968-2018	1968 г. *	2018 г. **	изменение за 1968-2018 гг. / change in 1968-2018	1968 г. *	2018 г. **
Без удобрений / Without fertilizers	6,50	5,48	-1,02	1,08	0,91	-0,17	16	28	+12	81	93	+12		
Навоз 10 т/га / Manure 10 t/ha	6,40	5,83	-0,57	1,08	1,25	+0,17	16	72	+56	94	152	+58		
Навоз 20 т/га / Manure 20 t/ha	6,50	6,04	-0,46	1,08	1,47	+0,39	19	122	+103	73	191	+118		
N ₅₀ P ₂₅ K ₆₀	6,50	5,47	-1,03	1,08	1,04	-0,04	19	51	+32	75	142	+67		
Навоз 5 т/га + N ₂₅ P ₁₂ K ₃₀ / Manure 5 t/ha + N ₂₅ P ₁₂ K ₃₀	6,25	5,36	-0,89	1,08	1,07	-0,01	19	57	+38	73	150	+77		
Навоз 10 т/га + N ₅₀ P ₂₅ K ₆₀ / Manure 10 t/ha + N ₅₀ P ₂₅ K ₆₀	6,10	5,59	-0,51	1,08	1,26	+0,18	19	125	+106	85	201	+116		
N ₁₀₀ P ₅₀ K ₁₂₀	6,45	4,91	-1,54	1,08	1,08	0,00	19	109	+90	76	164	+88		
Навоз 10 т/га + N ₁₀₀ P ₅₀ K ₁₂₀ / Manure 10 t/ha + N ₁₀₀ P ₅₀ K ₁₂₀	6,10	5,27	-0,83	1,08	1,25	+0,17	22	156	+134	75	246	+171		

*Исходное значение, **значение по завершению 11-й ротации севооборота / *Original value, ** value at the end of the 11th rotation of the crop rotation

Таблица 5 – Численность основных физиологических групп микроорганизмов в пахотном слое дерново-подзолистом супесчаной почвы в зависимости от внесенных удобрений /
Table 5 – The number of the main physiological groups of microorganisms in the arable layer of sod-podzolic sandy loamy soil, depending on fertilizers

Вариант / Variant	КOE*10 ⁶ /г почвы / CFU*10 ⁶ /g of soil													
	Протеолитические (среда МПА) / Proteolytic (medium MPA)	Амилитические (среда КАА) / Amylolytic (medium KAA)	Целлюлолитические (среда Гетчинсона) / Cellulolytic (Getchinson medium)	Микромицеты (среда Чапека) / Micromycetes (Chapek medium)	Нитрификаторы / Nitrifiers	Денитрификаторы / Denitrifiers			МПА / MPA	КАА / KAA	МПА / MPA	КАА / KAA		
Без удобрений / Without fertilizers	8,2	13,7	0,030	0,040	0,007	0,75								
Навоз 20 т/га / Manure 20 t/ha	15,9	18,1	0,059	0,079	0,016	2,50								
Навоз 10 т/га + N ₅₀ P ₂₅ K ₆₀ / Manure 10 t/ha + N ₅₀ P ₂₅ K ₆₀	16,8	20,7	0,055	0,061	0,015	2,50								
N ₁₀₀ P ₅₀ K ₁₂₀	12,2	16,9	0,065	0,091	0,016	0,95								
HCP _{0,5} / LSD _{0,5}	3,15	3,35	0,019	0,014	0,04	0,21								

Наиболее высокое содержание калия в почве в конце 11-ой ротации – 246 мг/кг отмечено при внесении навоза в дозе 10 т/га совместно с минеральными удобрениями $N_{100}P_{50}K_{120}$. В целом следует указать на улучшение калийного режима супесчаной почвы в конце 11-ой ротации при длительном применении органоминеральной системы с повышенными и высокими дозами удобрений.

Устойчивость агроценозов во многом зависит от микробиологического состояния почвы. Численность почвенной микрофлоры является лабильной величиной, на которую влияют температура и влажность почвы, состав растительного покрова, а также система удобрения в севообороте [13, 14]. В таблице 5 приведены усредненные данные о численности основных групп микроорганизмов в верхних слоях почвы, полученные в конце 11-й ротации. Результаты свидетельствуют о высоком эффекте всех применяемых систем удобрения.

При использовании органической системы удобрения (навоз 20 т/га) численность амиллолитических микроорганизмов (КАА) была достаточно высокой – на 30 % больше контроля. Максимальных значений в условиях опыта этот показатель достигал при использовании органоминеральной системы удобрения (навоз 10 т/га + $N_{50}P_{25}K_{60}$) – на 53 % выше варианта без удобрений. Численность микроорганизмов, использующих органические формы азота (МПА), при применении органической и органоминеральной систем удобрения возрастала в 1,9-2,1 раза, при использовании минеральной системы она увеличилась в 1,5 раза.

Количество нитрификаторов в слое 0-20 см почвы повышалось в 2,4 раза в вариантах с органической системой удобрения (навоз 20 т/га). Внесение минеральных удобрений ($N_{100}P_{50}K_{120}$) обеспечивало увеличение численности этой группы микроорганизмов в 2,3 раза, совместное внесение минеральных и органических удобрений – в 2,2 раза.

Численность денитрифицирующих микроорганизмов своего максимума достигала в вариантах с органической и органоминеральной системами удобрения, в почве которых накапливалось предельное количество минерального азота.

При использовании органической и органоминеральной систем удобрения соотношение численности микроорганизмов, развивающихся на КАА и МПА, составило 1,1-1,2, что свиде-

тельствует о сбалансированности процессов минерализации органического вещества в почве и его гумификации. В варианте с минеральной системой удобрения, как и контроле, преобладание амиллолитических микроорганизмов над протеолитическими указывает на преимущество процессов минерализации органического вещества над его синтезом.

Заключение. На основе изучения длительного (1968-2018 гг.) использования минеральной, органоминеральной и органической систем удобрения на дерново-подзолистой супесчаной почве установлено, что применение органических и минеральных удобрений при оптимизации доз и их сочетаний является важным фактором повышения продуктивности и устойчивости сельскохозяйственных культур зернопропашного севооборота.

Лучшие результаты по продуктивности и устойчивости агроценозов получены при применении органоминеральной системы удобрения с использованием средних (навоз 5 т/га + $N_{25}P_{12}K_{30}$) и повышенных доз (навоз 10 т/га + $N_{50}P_{25}K_{60}$), которые обеспечивали получение 34,2-39,9 ц з. е./га в год, окупаемость 1 кг NPK составила 9,0-6,5 кг з. е.

Минеральная система удобрения в дозах ($N_{50-100}P_{25-50}K_{60-120}$) обеспечила продуктивность зернопропашного севооборота 35,4-38,9 ц з. е./га., окупаемость 1 кг NPK урожаем составила 9,8-6,2 кг з. е. Оплата 1 кг элементов питания урожаем зависела от доз внесенных удобрений. В вариантах с длительным использованием минеральной системы удобрения содержание гумуса не превышало 1,04-1,08 %.

Органическая система удобрения (10-20 т/га подстильного навоза) по продуктивности севооборота была менее эффективна по сравнению с минеральной в 1,2 раза, органоминеральной – в 1,3 раза и составила 30,1-33,7 ц з. е./га, при оплате 1 кг NPK – 6,4-4,1 кг з. е., но способствовала улучшению гумусного состояния почвы.

Урожайность культур севооборота получена равной при минеральной ($N_{50}P_{25}K_{60}$) и органоминеральной (навоз 5 т/га + $N_{25}P_{12}K_{30}$) системах удобрения. При повышенных дозах удобрений наибольшее влияние на урожайность культур оказала органоминеральная система удобрения.

Анализ основных агрохимических свойств почвы показал, что за период проведения опыта (1968-2018 гг.) наблюдали стабилизацию

основных показателей почвенного плодородия (содержание гумуса, подвижного фосфора и калия) при использовании средних доз (навоз 10 т/га + N₅₀P₂₅K₆₀) удобрений. При внесении повышенных доз (навоз 10 т/га + N₁₀₀P₅₀K₁₂₀) удобрений отмечено увеличение содержания питательных веществ в почве.

Окультуривание почвы при длительном применении органических и минеральных удобрений способствовало заметному увеличению численности основных физиологических групп микроорганизмов и повышению биогенности почвы.

Список литературы

1. Кирюшин В. И. Адаптивно-ландшафтные системы земледелия – основа современной агротехнологической политики России. *Земледелие*. 2000;(3):4-6.
2. Кузьменко Н. Н. Изменение показателей плодородия дерново-подзолистой почвы при использовании агротехнологий различной интенсивности в льняном севообороте. *Агрохимия*. 2018;(9):14-19. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0002188118090077> EDN: UWYVHK
3. Минеев В. Г., Гомонова Н. Ф., Морачевская Е. В. Изменение свойств и калийного состояния дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы при 40-летнем применении агрохимических средств. *Агрохимия*. 2013;(10):3-12. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20394826> EDN: RENUPV
4. Хайдуков К. П., Шевцова Л. К., Коваленко А. А., Милютин А. А. Влияние длительного применения и последствий различных систем удобрения на кислотность, содержание и качественный состав органического вещества почвы. *Плодородие*. 2014;(1(76)):30-33. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21154607> EDN: RUYBZH
5. Dai S., Wang J., Cheng Y., Zhang J., Cai Z. Effects of long-term fertilization on soil gross N transformation rates and their implications. *Journal of Integrative Agriculture*. 2017;16(12):2863-2870. DOI: [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(17\)61673-3](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(17)61673-3)
6. Vasiljauskienė V., Masauskas V. Vilnius. *Tresimo sistemų ir dirvožemio derlingumas/Sudaryt.* 1994. Pp. 248-293.
7. Лапа В. В., Иващенко Н. Н. Продуктивность севооборотов и изменение агрохимических показателей дерново-подзолистой супесчаной почвы при длительном применении удобрений. *Почвоведение и агрохимия*. 2013;(1(50)):133-144. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36264010> EDN: TWZOYS
8. Дзюин А. Г. Влияние систем удобрений в длительном стационаре на продуктивность севооборота и агрохимические показатели почвы. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2019;(5):103-108. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38165687> EDN: BGDUDB
9. Сычев В. Г., Беличенко М. В., Романенков В. А. Результаты мониторинга урожайности сельскохозяйственных культур, продуктивности севооборотов и изменения свойств почв в длительных опытах географической сети. *Плодородие*. 2017;(6):2-5. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32312225> EDN: YMJIWY
10. Лукин С. М., Мерзлая Г. Е. Сравнительная эффективность различных систем удобрения при длительном их применении в севооборотах. *Плодородие*. 2016;(5):42-47. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27175741> EDN: WWRWAB
11. Хазиев Ф. Х., Гулько А. Е. Ферментативная активность почв агроценозов и перспективы ее изучения. *Почвоведение*. 1991;(8):88-103. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28419580> EDN: XXXNZR
12. Witter E., Martensson A. M., Garcia F. V. Size of the soil microbial biomass in a long-term field experiment as affected by different N-fertilizers and organic manures. *Soil Biology and Biochemistry*. 1993;25(6):659-669. DOI: [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(93\)90105-K](https://doi.org/10.1016/0038-0717(93)90105-K)
13. Ушаков Р. Н., Ручкина А. В. Влияние плодородия агросерой почвы на активность микрофлоры в условиях засухи в нечерноземной зоне России. *Агрохимия*. 2020;(6):69-77. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002188120060137> EDN: XIKRBE
14. Мерзлая Г. Е. Исследование устойчивости агроценозов при длительном применении удобрений на дерново-подзолистой почве. *Почвоведение*. 2021;(3):355-362. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X21030126> EDN: OYEELE

References

1. Kiryushin V. I. Adaptive landscape farming systems are the basis of modern agro-technological policy in Russia. *Zemledelie*. 2000;(3):4-6. (In Russ.).
2. Kuzmenko N. N. Dynamics of sod-podzolic soil fertility under agrotechnologies of different intensity in flax crop rotation. *Agrokhimiya*. 2018;(9):14-19. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.1134/S0002188118090077>
3. Mineev V. G., Gomonova N. F., Morachevskaya E. V. Changes in potassium status and properties of loamy soddy-podzolic soil caused by the 40-year-long application of agrochemicals. *Agrokhimiya*. 2013;(10):3-12. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20394826>

4. Khaydukov K. P., Shevtsova L. K., Kovalenko A. A., Milyutina A. A. Effect and aftereffect of the long-term use of different fertilizing systems on the acidity and organic matter of soil. *Plodorodie*. 2014;(1(76)):30-33. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21154607>
5. Dai S., Wang J., Cheng Y., Zhang J., Cai Z. Effects of long-term fertilization on soil gross N transformation rates and their implications. *Journal of Integrative Agriculture*. 2017;16(12):2863-2870. DOI: [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(17\)61673-3](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(17)61673-3)
6. Vasiliauskienė V., Masauskas V. Vilnius. Tresimo sistemos ir dirvožemio derlingumas/Sudaryt. 1994. Pp. 248-293.
7. Lapa V. V., Ivakhnenko N. N. Productivity of crop rotations and changes agrochemical properties of loamy sandy soddy-podzolic soil under long-term fertilization. *Pochvovedenie i agrokimiya*. 2013;(1(50)):133-144. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36264010>
8. Dzyuin A. G. Influence of fertilizer systems in long-term hospitality of crop rotation and agrochemical indicators of soil. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy* = International Journal of Applied And Fundamental Research. 2019;(5):103-108. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38165687>
9. Sychev V. G., Belichenko M. V., Romanenkov V. A. Results of monitoring crop yields, productivity of crop rotations, and changes in soil properties in long-term experiments of geographic network. *Plodorodie*. 2017;(6):2-5. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32312225>
10. Lukin S. M., Merzlaya G. E. Comparative efficiencies of different long-term fertilization systems in crop rotations. *Plodorodie*. 2016;(5):42-47. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27175741>
11. Khaziev F. Kh., Gulko A. E. Enzymatic activity of soils under agrocoenoses: status and problems. *Pochvovedenie* = Eurasian Soil Science. 1991;(8):88-103. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28419580>
12. Witter E., Martensson A. M., Garcia F. V. Size of the soil microbial biomass in a long-term field experiment as affected by different N-fertilizers and organic manures. *Soil Biology and Biochemistry*. 1993;25(6):659-669. DOI: [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(93\)90105-K](https://doi.org/10.1016/0038-0717(93)90105-K)
13. Ushakov R. N., Ruchkina A. V. Influence of agro-gray soil fertility on microflora activity in the conditionsof drought in the non-chernozem zone of Russia. *Agrokimiya*. 2020;(6):69-77. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002188120060137>
14. Merzlaya G. E. Agrocenosis stability during long-term application of fertilizers on soddy-podzolic soil. *Pochvovedenie* = Eurasian Soil Science. 2021;(3):355-362. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X21030126>

Сведения об авторе

✉ **Золкина Екатерина Ивановна**, научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт органических удобрений и торфа – филиал ФГБНУ «Верхневолжский федеральный аграрный центр», ул. Прянишникова, д. 2, п. Вяткино, Судогодский район, Владимирская область, Российская Федерация, 601390, e-mail: vniiou@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0906-7494>, e-mail: ek.Zolkina2017@yandex.ru

Information about the author

✉ **Ekaterina I. Zolkina**, researcher, All-Russian Research Institute of Organic Fertilizers and Peat – a branch of the Verkhnevolzhsky Federal Agrarian Center, Pryanishnikova str., 2, Vyatkin village, Sudogodsky district, Vladimir region, Russian Federation, 601390, e-mail: vniiou@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0906-7494>, e-mail: ek.Zolkina2017@yandex.ru

✉ – Для контактов / Corresponding author

КОРМОПРОИЗВОДСТВО: КОРМЛЕНИЕ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЖИВОТНЫХ / FODDER PRODUCTION: LIVESTOCK FEEDING

<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.5.820-829>

УДК 636.085.15



Нормализация белкового и углеводного питания высокопродуктивных коров в период сухостоя

© 2023. Л. Н. Кузьмина, А. П. Карташова ✉, С. С. Кузьмин

ФГБНУ «Мурманская государственная сельскохозяйственная опытная станция»,
п. Молочный, Мурманская обл., Российская Федерация

В работе представлены результаты изучения протеинового и углеводного питания высокопродуктивных коров с удоем 10 тыс. кг молока в период сухостоя. Проведены исследования по определению распадаемости протеина кормов и эффективности их использования в рационах коров. Изучено углеводное питание голшти-низированных коров холмогорской породы в период сухостоя с учетом количества и качества нейтральнотергентной (НДК) и кислотнотергентной (КДК) клетчатки. Научно-хозяйственный опыт проводили в СХПК «Полярная звезда» Мурманской области в 2015 и 2021 гг. Распадаемость сырого протеина кормов (РП) определяли методом in sacco, путем инкубации в рубце средних проб отдельных кормов в нейлоновых мешочках в течение 12 часов. В образцах кормов до и после инкубации определяли содержание сырого протеина по содержанию общего азота методом Кельдаля. Переваримость в кишечнике не распадавшегося в рубце протеина кормов определяли методом мобильных синтетических мешочков. НДК и КДК определяли по методу Ван-Соеста и Саутгейта в модификации Н. Н. Семиной. В опыте по протеиновому питанию в рационе коров контрольной и опытной групп уровень сырого протеина в СВ составил 16,0 %, распадаемого протеина в контрольной – 59,0 %, в опытной – 67,0 %. По углеводному питанию в рационе контрольной группы содержалось 19,4 % сырой клетчатки в СВ, 38,9 % – нейтральнотергентной клетчатки, 23,0 % – кислотнотергентной клетчатки по сухому веществу. У коров опытной группы в рационе содержалось сырой клетчатки в СВ – 22,4 %, НДК – 47,2 %, КДК – 27,6 %. Животные опытной группы, рацион которых имел расщепляемость сырого протеина 67,0 %, более эффективно использовали азот и питательные вещества рациона. Исследованиями установлено, что содержание в рационах опытных коров НДК до 47,2 % и КДК до 27,6 % приводит к повышению переваримости питательных веществ рациона, улучшает азотистый обмен, усиливает микробиологическую активность в рубце коров.

Ключевые слова: рацион, протеин, нейтральнотергентная клетчатка, кислотнотергентная клетчатка, структурные углеводы

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Мурманская государственная сельскохозяйственная опытная станция», (тема №FGER-2021-0001, регистрационный номер АААА-А19-119011790116-7).

Выражаем благодарность коллективу ООО «Полярная звезда» Мурманской области за помощь в проведении исследований.

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Кузьмина Л. Н., Карташова А. П., Кузьмин С. С. Нормализация белкового и углеводного питания высокопродуктивных коров в период сухостоя. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2023;24(5):820-829. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.5.820-829>

Поступила: 18.05.2023

Принята к публикации: 11.10.2023

Опубликована онлайн: 30.10.2023

Normalization of protein and carbohydrate nutrition for high productive cows during a dry period

© 2023. Lyudmila N. Kuzmina, Anastasia P. Kartashova ✉, Sergey S. Kuzmin

Murmansk State Agricultural Experimental Station, Molochniy, Murmansk region,
Russian Federation

The article provides the results of study of protein and carbohydrate nutrition for high productive cows with milk yield of 10 thousand kg during dry period. There has been carried out the research for determining the feed protein disintegration and effectiveness of its use in cow rations. The carbohydrate nutrition for Holstein-Kholmogory cows during dry period taking into account quantity and quality of neutral detergent fiber (NDF) and acid detergent fiber (ADF) was studied.

The science-economic experiment was conducted in the "Polyarnaya Zvezda", Murmansk region in 2015 and 2021. The disintegration of feed crude protein (DP) was determined by the in sacco method, by incubation of average samples of single feeds in nylon bags in the rumen during 12 hours. Content of crude protein in feed samples before and after incubation was determined by the content of total nitrogen by the Kjeldahl method. Digestibility in the intestine of feed protein not disintegrated in rumen was determined by the mobile synthetic bag method. NDF and ADF were determined by the method of Van Soest and Southgate modified by N. N. Semina. In the experiment of protein nutrition, the content of crude protein in the ration of control and experimental groups of cows was 16 %. The content of disintegrated protein in the control group was 59.0 %, in the experimental group – 67.0 %. In the experiment of carbohydrate nutrition, in the control group crude fiber was 19.4 %, neutral detergent fiber – 38.9 %, acid detergent fiber – 23.0 % of dry matter. In the ration of experimental group of cows, the content of crude fiber was 22.4 %, neutral detergent fiber – 47.2 %, acid detergent fiber – 27.6 %. Animals of the experimental group whose ration had a crude protein disintegration of 67.0% used nitrogen more efficiently, utilized a nutritious of ration better. During the research it has been established, that the content of neutral detergent fiber of up to 47.2 % and acid detergent fiber of up to 27.6 % results in increase in digestibility of ration nutritious, improves nitrogen metabolism, intensify microbiological activity in cow rumen.

Keywords: ration, protein, neutral detergent fiber, acid detergent fiber, structural carbohydrates

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 Murmansk State Agricultural Experimental Station (topic No. FGER-2021-0001, registration number AAAA-A19-119011790116-7).

The authors thank the staff of Polyarnaya Zvezda, Murmansk Region, for their assistance in conducting of the research.

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

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

For citation: Kuzmina L. N., Kartashova A. P., Kuzmin S. S. Normalization of protein and carbohydrate nutrition for high productive cows during a dry period. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2023;24(5):820-829. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.5.820-829>

Received: 18.05.2023

Accepted for publication: 11.10.2023

Published online: 30.10.2023

Для получения высокой продуктивности молочных коров необходимо обеспечение их оптимальным уровнем белка и энергии. Показатель «переваримый протеин», используемый до сих пор для оценки протеиновой питательности, не отражает качества протеина корма [1, 2]. Оценка протеиновой обеспеченности жвачных животных складывается из следующих параметров: микробный синтез в преджелудках, доступность кормового и микробного белка. Расчет рационов по сырому и переваримому протеину, без учета его качества, приводит к перерасходу белковых дорогостоящих кормов. Последствия этого – удорожание продукции, негативное влияние на состояние здоровья животных. Важным показателем является расщепляемость сырого протеина. Ферментация питательных веществ корма в преджелудках жвачных животных является основным этапом в процессе их переваривания [3, 4].

Для эффективного усвоения питательных веществ организмом рубцовая микрофлора нуждается в легкодоступном азоте и энергии. При недостаточном количестве легкораспадающегося протеина интенсивность переваривания грубых и концентрированных кормов в рубце коров резко снижается [5, 6].

Животные с низкой продуктивностью удовлетворяют свои потребности в протеине за счет микробного синтеза в рубце. Высокопродуктивным жвачным животным необходим протеин кормов, не распавшийся в рубце, дополнительно к микробному [7, 8].

В связи с этим, важным условием является определение протеина, устойчивого к деградации в рубце для использования его животным-хозяином. Поэтому качество протеина и создание условий для оптимального синтеза микробного белка в преджелудках животных для обеспечения потребностей микроорганизмов в расщепляемом протеине и труднораспадаемом протеине для животного является одной из основ нормирования протеинового питания высокопродуктивных коров с удоем 10 тыс. кг молока и более в период сухостоя.

Реализация достижений селекционно-племенной работы основана на полноценном кормлении. Большое значение в обеспечении энергетических потребностей жвачных животных принадлежит клетчатке [9, 10]. Многочисленными проводимыми исследованиями установлено, что от 40 до 75 % сырой клетчатки кормов переваривается в желудочно-кишечном тракте крупного рогатого скота (Henneberg and Stohman, 1864)¹ [11]. Поэтому большую

¹Мокшина С., Дрохнер В., Тафай М. Перевариваемость клетчатки в рубце лактирующих коров. По материалам журнала «Животноводство России», сентябрь, 2005. URL: http://yariks.info/pi_jivotnovodstvo/jiv_021/

часть энергии жвачные животные могут получать из объемистых кормов, качество которых имеет большое значение для высокопродуктивных коров. Показатель «сырая клетчатка» дает неточное представление о количестве структурных полисахаридов. При этом определяется лишь часть целлюлозы и лигнина, большая часть структурных углеводов – целлюлозы и гемицеллюлоз остаются неучтенными [12, 13].

Фракционирование углеводов на нейтральнодетергентную и кислотдетергентную клетчатку дало возможность по-другому оценивать сбалансированность рационов по энергии. Ван Соест и Мур² предложили новую схему анализа растительных кормов. В ней наиболее наглядно характеризуется питательность корма, в котором различают клеточное содержимое и клеточные стенки, а последние – по другим составным элементам. В результате обработки корма нейтральным детергентом содержимое клеток (липиды, сахара, крахмал, органические кислоты, растворимые протеины, пектины) растворяются в нем. Остается волокнистая фракция, содержащая клеточные стенки. Эта фракция представляет собой нейтральнодетергентную клетчатку (НДК), которая состоит из гемицеллюлоз, целлюлозы и лигнина. При обработке нерастворенного в нейтральном детергенте осадка кислотным детергентом растворяются гемицеллюлозы. Оставшийся осадок (лигнин и целлюлоза) представляют собой кислотдетергентную клетчатку (КДК) [14, 15, 16].

В последнем выпуске справочного пособия по нормам кормления сельскохозяйственных животных нормирование дойных и сухостойных коров по уровню НДК и КДК не предусмотрено³. В практике, в нашей стране до сих пор преимущественно используют показатель «сырая клетчатка» при составлении рационов кормления коров. Поэтому дальнейшие исследования по содержанию структурных углеводов в рационах высокопродуктивных коров являются актуальными.

Цель исследования – определить качество протеина кормов для создания условий оптимального синтеза микробного белка в преджелудках животных и транзита трудно-распадаемого протеина в кишечник в период сухостоя. Установить оптимальный уровень нейтрально- и кислотдетергентной клетчатки в рационах коров в период сухостоя с учетом их количества, качества и эффективности использования.

Новизна исследований – впервые установлено оптимальное количество нейтральнодетергентной и кислотдетергентной клетчатки в рационах высокопродуктивных голштинизированных коров холмогорской породы в период сухостоя с учетом их доступности к перевариванию в рубце.

Материал и методы. Исследования проводили в СХПК «Полярная звезда» Мурманской области на голштинизированных коровах холмогорской породы с удоем 10 тыс. кг молока в апреле-мае 2015 и 2021 гг. во второй фазе сухостоя.

Схема опыта по протеиновому питанию

Показатель	Контрольная группа	Опытная группа
Количество животных	9	9
Уровень сырого протеина в рационе, %	16,0	16,0
Распадаемость протеина в рационе, %	59,0	67,0

Схема опыта по углеводному питанию

Количество животных	9	9
Уровень сырой клетчатки, %	19,4	22,4
НДК, %	38,9	47,2
КДК, %	23,0	27,6

²Van Soest P. J., Moore L. A. New chemical methods for analysis of forages for the purpose of predicting nutritive value. Proc. IX Int. Grassl. Congr. Sao Paulo, Brazil. 1965;424(1):783-789.

³Калашников А. П., Фисинин В. И., Щеглов В. В., Клейменов Н. И. Нормы и рационы кормления сельскохозяйственных животных: справочное пособие. 3-е изд. перераб. и доп. М., 2003. 456 с.

Распадаемость сырого протеина кормов (РП) определяли методом *in sacco* путем инкубации в рубце средних проб отдельных кормов в нейлоновых мешочках в течение 12 часов. В образцах кормов до и после инкубации определяли содержание сырого протеина по содержанию общего азота методом Кьельдаля. Переваримость в кишечнике не распавшегося в рубце протеина кормов определяли методом мобильных синтетических мешочков.

Для взятия содержимого рубца применяли резиновый шланг, длиной около двух метров, внутренний диаметр шланга 20 мм. В рубцовом содержимом, взятом на 51 сутки сухостойного периода, через 3 часа после кормления определяли: рН, аммиак в чашках Конвея, все фракции азота методом Кьельдаля, численность инфузорий в камере Горяева.

В моче: мочевины уреазным методом, общий азот. В кале: полный зоотехнический анализ, как в кормах, нерастворимую в 4н HCl золу.

Контроль за клиническим состоянием животных определяли путем взятия крови на биохимический анализ. В крови определяли: рН – электрометрическим методом с помощью потенциометра ЛПУ-01; сахар по Сомоджи; кислотную емкость – электрометрическим титрованием; общий белок – на рефрактометре; кальций – по де Ваарду; фосфор – по способу Бригса в модификации Юделевича; каротин – по Ф. А. Коромыслову и А. А. Кудрявцевой.

Отобранные образцы кормов (сено, силос, сенаж) были проинкубированы в условиях *in vitro*, имитирующих рубцовую среду (к 700 мл профильтрованной через четыре слоя марли рубцовой жидкости добавляли 2800 мл буфера Мак-Даугала). Образцы размолотых кормов в мешочках из синтетической ткани помещали в прибор «искусственный рубец» на 48 часов при температуре 39 °С в термостат. Анализ сухого

вещества, сырой клетчатки, НДК и КДК проводили до и после инкубации. НДК и КДК определяли по методу Ван-Соеста и Саутгейта в модификации Н. Н. Семиной⁴.

Целлюлозолитическую активность микрофлоры преджелудков определяли по методу Хендерсона, Хорвата и Блока в модификации Чюрлиса⁵.

Цифровой материал обработан методом вариационной статистики по Плохинскому⁶. Достоверность разницы определяли по Стьюденту, разницу считали достоверной при $P < 0,05$.

Результаты и их обсуждение. После проведения инкубации образцов кормов в рубце коров получены следующие показатели (табл. 1).

Исходя из полученных результатов, составлен рацион для коров опытной и контрольной групп. Распадаемость протеина кормов в рационе коров контрольной группы составила 59,0 %, опытной группы – 67,0 % (табл. 2).

Показатели рубцового содержимого, крови и мочи, взятых во время балансового опыта, сохранялись в пределах физиологической нормы.

Азотистый обмен в рубце коров опытной и контрольной групп существенно различался. Количество общего азота в рубцовом содержимом у животных опытной группы было на 1,3 % больше, чем в контрольной, белкового азота в этой группе было больше на 4,4 % и составило 61,37 мг/% против 58,80 мг/% ($P < 0,05$). По концентрации аммиака наблюдали такую же закономерность. Количество простейших было достоверно выше в опытной группе, то есть наблюдалась активация протеолиза и более эффективный синтез микробного белка. Сахаропротеиновое отношение в опытной группе составляло 0,90, в контрольной – 0,86, что соответствовало нормам кормления.

Показатели крови у коров обеих групп находились в пределах физиологической нормы.

⁴Новые методы и модификации биохимических и физиологических исследований в животноводстве: методическое руководство. Вып. 2. Под ред. Н. А. Шманенкова, Н. В. Курилова. Боровск, Изд-во: ВНИИФБиП, 1972. С. 96-105.

⁵Чюрлис Т. К. О методике определения активности расщепляющей целлюлозу микрофлоры преджелудков у крупного рогатого скота. Кормление сельскохозяйственных животных. М., 1958. С. 470-475.

⁶Плохинский Н. А. Биометрия: учеб. пособие для студентов биол. спец. ун-тов. 2-е изд. М.: Изд-во Московского ун-та, 1970. 367 с

**ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ: КОРМОПРОИЗВОДСТВО.
КОРМЛЕНИЕ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЖИВОТНЫХ /
ORIGINAL SCIENTIFIC ARTICLES: FODDER PRODUCTION. LIVESTOCK FEEDING**

Таблица 1 – Распадаемость протеина кормов в рубце коров с удоем 10 тыс. кг /

Table 1 – Disintegration of feed protein in the rumen of cows with a milk yield of 10 thousand kg

<i>Корм / Feed</i>	<i>Распадаемость, % / Disintegration, %</i>	<i>Корм / Feed</i>	<i>Распадаемость, % / Disintegration, %</i>
Силос из многолетних трав / Perennial grass silage	64,7	Пшеница / Wheat	78,1
Сено луговое / Meadow hay	39,1	Рожь / Rye	75,0
Жмых подсолнечный / Sunflower cake	50,7	Ячмень / Barley	78,0
Шрот подсолнечный / Sunflower meal	74,9	Пивная дробина / Brewers' spent grains	43,3
Жмых соевый / Soybean cake	40,7	Барда сухая (ячмень) / Dry stillage (barley)	29,0
Комбикорм стандартный / Standard mixed fodder	67,0	Кунжут / Sesame	77,8
Жом свекловичный (сухой) / Beet pulp (dry)	46,2	Жмых грецкого ореха / Walnut cake	72,3
Рыбная мука / Fish flour	27,2	Жмых тыквенный / Pumpkin cake	27,6
Горох / Pea	85,0	Отруби пшеничные / Wheat bran	71,3
Кукуруза / Corn	36,0		

Таблица 2 – Рационы кормления коров во время опыта (протеиновое питание) /

Table 2 – Feeding rations for cows during the experiment (protein nutrition)

<i>Показатель / Indicator</i>	<i>Контрольная группа / Control group</i>	<i>Опытная группа / Experimental group</i>
Комбикорм, кг / Mixed fodder, kg	6,6	3,5
Силос, кг / Silage, kg	22,0	22,0
Сено, кг / Hay, kg	4,5	4,5
Горох, кг/ Pea, kg	-	2,5
Патока свекловичная, кг / Beet molasses, kg	1,5	1,5
Соль поваренная, г / Common salt, g	0,1	0,1
Премикс, г / Premix, g	0,1	0,1
<i>В рационе содержится / The ration contains:</i>		
Обменной энергии, Мдж / Exchange energy, MJ	165,0	165,0
ЭКЕ / Energy Feed Units	16,5	16,5
Сухого вещества, кг / Dry matter, kg	14,44	14,44
Сырого протеина, г / Crude protein, g	2306,9	2280,3
Сырой клетчатки, г/ Crude fiber, g	3544,0	3545,0
Сахара, г / Sugar, g	1388,0	1440,0
Сырого жира, г / Crude fat, g	714,3	711,0
Кальция, г / Calcium, g	159,4	163,7
Фосфора, г / Phosphorus, g	157,8	162,3
Каротина, мг / Carotene, mg	922,5	922,5
Сырого протеина в СВ, % / Crude protein, %	15,9	15,8
Сырого жира в СВ, % / Crude fat in DM, %	4,5	4,5
Сырой клетчатки в СВ, % / Crude fiber in DM, %.	26,3	26,8
Распадаемость протеина, % / Disintegrated protein, %	59,0	67,0
Ca:P	1:1	1:1

**ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ: КОРМОПРОИЗВОДСТВО.
КОРМЛЕНИЕ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЖИВОТНЫХ /
ORIGINAL SCIENTIFIC ARTICLES: FODDER PRODUCTION. LIVESTOCK FEEDING**

В результате изучения баланса азота у подопытных коров выяснилось, что при одинаковом поступлении азота с кормом, его

усвоение животными опытной группы больше на 17,5 % при лучшем использовании азота от принятого и переваренного (табл. 3).

Таблица 3 – Баланс и использование азота подопытными животными /
Table 3 – Balance and use of nitrogen by experimental animals

Группа / Group	Принято с кормом, г / Taken with food, g	Выделено с калом, г / Excreted with feces, g	Перевари- лено, г / Digested, g	Коэффици- ент перева- римости, % / Digestibility coefficient, %	Выделено с мочой, г / Excreted in urine, g	Усвоено азота, г / Assimilated nitrogen, g	Использовано, % / Used, %	
							от при- нятого / of taken	от пере- варенного / of digested
Контрольная / Control	369,10 ±7,45	120,70 ±2,44	248,40 ±1,69	67,30	223,97 ±6,55	24,43 ±1,12	6,6	9,8
Опытная / Experimental	364,85 ±8,39	107,92 ±3,46	256,88 ±1,33*	70,42	228,17 ±7,44	28,71 ±2,23	7,9	11,2

*P<0,05

Животные опытной группы лучше переваривали питательные вещества, коэффициенты переваримости по сухому веществу были выше на 1,47 %; органическому веществу – на 2,87 %; сырому жиру – на 0,16 %; сырому протеину – на 3,25 % (P<0,05).

Из данных таблицы 4 следует, что грубо-волоконистые корма по группам – сенаж, силос, сено имеют разный процентный состав пита-

тельных веществ. Высокое содержание НДК отмечено в сене луговом – 34,83 %; более низкое в силосе из многолетних трав – 20,89 %. Количество КДК в кормах ниже количества НДК, так как в составе первой отсутствуют гемицеллюлозы. Так, в силосе из многолетних трав содержание КДК составляет 8,28 %, в сене – 21,91 %.

Таблица 4 – Содержание сухого вещества, сырой клетчатки, НДК и КДК в грубых кормах, % /
Table 4 – Content of dry matter, crude fiber, NDF and ADF in roughage, %

Корм / Feed	Сухое вещество / Dry matter	Сырая клетчатка / Crude fiber	НДК / NDF	КДК / ADF
Сенаж из многолетних трав / Perennial grass haylage	31,33	11,86	23,71	10,27
Силос из многолетних трав / Perennial grass silage	26,02	8,14	20,89	8,28
Сено луговое / Meadow hay	47,82	16,38	34,83	21,91

Переваримость НДК, КДК и сырой клетчатки рассчитывали по формуле:

КП = (переваренное питательное вещество) / (питательное вещество до инкубации) × 100, где КП – коэффициент переваримости.

Рацион для коров опытной и контрольной групп по углеводному питанию приведен в таблице 5.

По показателям питательных веществ рационы опытной и контрольной групп практически были одинаковыми. Различие было по содержанию сырой клетчатки, НДК и КДК. В рационе коров опытной группы содержалось сырой клетчатки – 3567 г, НДК – 47,2 % по

сырому веществу, КДК – 27,6 %, контрольной группы соответственно 3072 г, 38,9 %, 23,0 %.

Коровы опытной и контрольной групп практически полностью потребляли корма. Переваримость питательных веществ у коров опытной группы была несколько выше, чем в контрольной, переваримость сухого вещества и НДК в опытной группе составила 77,81 и 59,60 % против контрольной 73,45 и 56,11 % соответственно (P<0,05). Переваримость сырой клетчатки в опытной группе была выше, чем в контрольной на 6,97 % (табл. 6).

**ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ: КОРМОПРОИЗВОДСТВО.
КОРМЛЕНИЕ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЖИВОТНЫХ /
ORIGINAL SCIENTIFIC ARTICLES: FODDER PRODUCTION. LIVESTOCK FEEDING**

Таблица 5 – Рационы кормления коров во время опыта (углеводное питание) /
Table 5 – Feeding rations for cows during the experiment (carbohydrate nutrition)

Показатель /	Контрольная группа / Control group	Опытная группа / Experimental group
Комбикорм, кг / Mixed fodder, kg	4,0	3,0
Сенаж из многолетних трав, кг / Silage, kg	15,0	15,0
Силос из многолетних трав, кг	-	6,0
Сено, кг / Hay, kg	4,0	4,0
Ячмень дробленый, кг/ Pea, kg	2,5	1,5
Жмых подсолнечный, кг / Beet molasses, kg	0,5	1,0
<i>В рационе содержится / The ration contains:</i>		
Обменной энергии, Мдж / Exchange energy, MJ	165,1	159,1
ЭКЕ / Energy Feed Units	16,5	15,9
Сухого вещества, кг / Dry matter, kg	15,83	15,89
Сырого протеина, г / Crude protein, g	2600,0	2664,0
Сырой клетчатки, г/ Crude fiber, g	3072,0	3567,0
Сахара, г / Sugar, g	394,2	416,1
Сырого жира, г / Crude fat, g	401,8	447,0
Кальция, г / Calcium, g	246,2	243,8
Фосфора, г / Phosphorus, g	187,3	184,4
Каротина, мг / Carotene, mg	875,0	885,0
Сырого протеина в СВ, % / Crude protein, %	16,4	16,7
Сырого жира в СВ, % / Crude fat in DM, %	3,5	3,7
Сырой клетчатки в СВ, % / Crude fiber in DM, %.	19,4	22,4
НДК, % / NDF, %	38,9	47,2
КДК, % / ADF, %	23,0	27,6
Ca:P	1,4:1	1,4:1

Таблица 6 – Коэффициенты переваримости питательных веществ рационов подопытных коров
в период сухостоя, % /

Table 6 – Digestibility coefficients of nutrients in the rations of experimental cows during the dry period, %

Группа/ Group	Сухое вещество / Dry matter	Сырая клетчатка / Crude fiber	НДК / NDF	Сырой протеин / Crude protein	Сырой жир / Crude fat
Контрольная / Control	73,45± 0,81	49,21±0,79	56,11±0,70	71,73±1,22	77,68±0,89
Опытная / Experimental	77,81± 0,74*	52,64±0,82	59,60±0,77*	72,45±0,96	77,54±1,02

* P < 0,05

Это, по-видимому, связано с соотношением целлюлоз и гемицеллюлоз в составе НДК, а также с угнетением целлюлозолитической активности рубцового содержимого коров контрольной группы, в результате повышения концентрированных кормов в рационе.

Более интенсивно ферментативные процессы протекали в рубце коров опытной группы, у которых наблюдали более высокое содержание простейших, белкового азота. Это свиде-

тельствует о создании благоприятных условий протекания биохимических процессов в рубце животных этой группы (табл. 7).

Целлюлозолитическая активность смешанной микрофлоры рубца также была достоверно выше в опытной группе. Процент гидролиза при инкубации целлюлозы в рубцовом содержимом составил у коров опытной группы – 58,5 %, в контроле – 45,0 % (P < 0,01).

*Таблица 7 – Показатели рубцовой жидкости коров в период балансового опыта /
Table 7 – Indicators of ruminal fluid of cows during the balance experiment*

<i>Показатель / Indicator</i>	<i>Контрольная группа / Control group</i>	<i>Опытная группа / Experimental group</i>
Азот, мг/% общий / Nitrogen, mg/% total	42,00±3,60	56,7±2,56*
Небелковый / Non-protein	27,30±1,25	31,50±1,63
Белковый / Protein	14,70±1,37	25,20±2,06*
pH	7,30±1,47	7,00±1,58
Аммиак, мг% / Ammonia, mg%	10,20±0,54	7,65±0,66
Простейшие, млн.шт./мл / Protozoa, mln/ml	0,980±0,024	1,120±0,036*

* P < 0,05

Использование азота животными двух групп, в рационе которых содержались разные уровни НДК и КДК, было неодинаковым. У животных, получавших корма с содержанием НДК – 47,2% и КДК – 27,6 %, было меньше потерь азота с мочой и калом, больше использовано на отложение в теле и развитие плода. Отложилось азота в теле – 36,05 г в опытной группе и 30,85 г – в контрольной, использовано от переваренного 14,24 и 12,70 % соответственно.

Таким образом, более сбалансированный рацион коров опытной группы способствовал повышению общего уровня энергетического питания животных.

Предложения производству. В состав рационов для высокопродуктивных коров во втором периоде сухостоя необходимо вводить те же компоненты, что и в период раздоя: с помощью кормления постепенно перевести микрофлору рубца на рацион с высоким содержанием концентратов и консервированных кормов (сенаж, силос).

Рационы кормления высокопродуктивных коров необходимо балансировать по НДК и КДК наряду с другими нормами кормления для более полной реализации генетического потенциала продуктивности.

Заключение. Рационы голштинизированных коров холмогорской породы с разной распадаемостью протеина оказали заметное

влияние на динамику образования метаболитов азотистого обмена, синтез микробного белка в рубце, переваривание и использование питательных веществ рациона при их скармливании.

Данные, полученные при проведении исследований, показали, что более интенсивный распад азотистых веществ в рубце с образованием аммиака протекал при распадаемости протеина рациона – 67,0 %; концентрация аммиака в рубце опытных коров была выше, чем в контроле (P<0,01). Содержание белкового азота и простейших также было достоверно выше в опытной группе.

Высокопродуктивным животным с удоем 10 тыс. кг молока для создания условий оптимального синтеза микробного белка в преджелудках и транзита труднораспадаемого протеина в кишечник в период сухостоя (вторая фаза) необходимо в рационах поддерживать сырой протеин на уровне 16 %, с распадаемостью 67 %.

При более высокой концентрации НДК в рационах возможно получить и более высокую их энергетическую ценность, чем в рационах с низкой ее концентрацией.

Рацион с содержанием НДК – до 47,2 %, КДК – до 27,6 % является оптимальным, так как обеспечил лучшую переваримость питательных веществ, более эффективное использование азота и большее отложение белка в организме.

Список литературы

1. Романенко Л. В., Пристач Н. В., Пристач Л. Н. Рациональное использование протеина корма высокопродуктивными коровами. Вопросы нормативно-правового регулирования в ветеринарии. 2018;(1):119-124. Режим доступа: <https://ilvm.elpub.ru/jour/article/view/36/0>
2. Латышева С. В., Иванов А. В. Оптимизируем белковое питание коров. Молочное и мясное скотоводство. 2021;(6):24-25. Режим доступа: http://skotovodstvo.com/file/repository/6_2021_milk_blok_24_25.pdf
3. Маслюк А. Н., Токарева М. А. Эффективность оптимизации протеинового и углеводного питания высокопродуктивных коров. Животноводство и кормопроизводство. 2018;101(4):164-171. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36736500> EDN: MBNGQC
4. Кузьмина Л. Н., Митюков А. С. Полноценное белковое питание голштин-холмогорских коров по периодам физиологического цикла. Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2017;(48):58-63. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30383540> EDN: ZOWYQX

5. Корчагина Ю. А. Современные подходы к протеиновому питанию высокопродуктивных коров. Вестник АПК Верхневолжья. 2019;(3):91-93. Режим доступа: <https://elibrary.ru/pduvov> EDN: PDUVOV
6. Шляхова О. Г. Белковое питание высокопродуктивных коров в переходный период: монография. Краснодар: Кубанский ГАУ имени И. Т. Трубилина, 2019. 139 с. Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/223946>
7. Рядчиков В. Г., Солдатов А. А., Харитонов Е. Л., Шляхова О. Г., Тантافي А., Комарова Н. С. Распадаемость кормового белка – важный фактор эффективности использования азота и молочной продуктивности лактирующих коров. Эффективное животноводство. 2019;(3(151)):42-48. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=39454369> EDN: SJAIIS
8. Волгин В. И., Романенко Л. В., Прохоренко П. Н. Полноценное кормление молочного скота – основа реализации генетического потенциала продуктивности. М.: РАН, 2018. 258 с.
9. Шарипов Д. Р., Якимов О. А., Галимуллин И. Ш. Влияние уровня нейтрально-детергентной клетчатки в рационе на потребление сухого вещества, молочную продуктивность и жевательную активность коров в первую фазу лактации. Ученые записки Казанской государственной академии ветеринарной медицины им. Н. Э. Баумана. 2019;240(4):201-205. DOI: <https://doi.org/10.31588/2413-4201-1883-240-4-201-205> EDN: IEEBFX
10. Кузьмина Л. Н., Карташова А. П., Корбут О. В., Кузьмин С. С. Роль структурных углеводов в питании коров в условиях Европейского Севера. Ветеринария и кормление. 2022;(6):44-46. DOI: <https://doi.org/10.30917/ATT-VK-1814-9588-2022-6-11> EDN: RYHZHI
11. Косолапов А. В. Переваримость питательных веществ и баланс азота у высокопродуктивных коров при введении в рацион полисахаридов. Кормопроизводство. 2017;(4):30-33. Режим доступа: https://kormoproizvodstvo.ru/arhiv_nomerov/arxiv-statej-doi/perevarimost-pitatelnyx-veshhestv-i-balans-azota-u-vysokoproduktivnyx-korov-pri-vvedenii-v-racion-polisaxaridov
12. Филинская О. В., Кеворкян С. А. Практические методы контроля современного комплекса. Вестник АПК Верхневолжья. 2018;(4(44)):30-36. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36813748> EDN: YUMJRB
13. Fustini M., Palmonari A., Canestrari G., Bonfante E., Mammi L., Pacchioli M. T., Sniffen G. C. J., Grant R. J., Cotanch K. W., Formigoni A. Effect of undigested neutral detergent fiber content of alfalfa hay on lactating dairy cows: Feeding behavior, fiber digestibility, and lactation performance. Journal of Dairy Science. 2017;100(6):4475-4483. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2016-12266>
14. Van Soest P. J., Robertson J. B., Lewis B. A. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. Journal of Dairy Science. 1991;74(10):3583-3597. DOI: [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(91\)78551-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(91)78551-2)
15. Ганущенко О. Клетчатка в рационах жвачных. Животноводство России. 2019;(10):37-42. DOI: <https://doi.org/10.25701/ZZR.2019.72.82.010> EDN: NESHCS
16. Raffrenato E., Fievisohn R., Cotanch K. W., Grant R. J., Chase L. E., Van Amburgh M. E. Effect of lignin linkages with other plant cell wall components on in vitro and in vivo neutral detergent fiber digestibility and rate of digestion of grass forages. Journal of Dairy Science. 2017;100(10):8119-8131. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2016-12364>

References

1. Romanenko L. V., Pristach N. V., Pristach L. N. Rational use of protein forage by highly productive cows. *Voprosy normativno-pravovogo regulirovaniya v veterinarii* = Legal regulation in veterinary medicine. 2018;(1):119-124. (In Russ.). URL: <https://ilvm.elpub.ru/jour/article/view/36/0>
2. Latysheva S. V., Ivanov A. V. Optimize the protein nutrition of cows. *Molochnoe i myasnoe skotovodstvo* = Journal of Dairy and Beef Cattle Farming. 2021;(6):24-25. (In Russ.). URL: http://skotovodstvo.com/file/repository/6_2021_milk_blok_24_25.pdf
3. Maslyuk A. N., Tokareva M. A. Optimization efficiency of protein and carbohydrate nutrition of highly productive cows. *Zhivotnovodstvo i kormoproizvodstvo* = Animal Husbandry and Fodder Production. 2018;101(4):164-171. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36736500>
4. Kuz'mina L. N., Mityukov A. S. Complete protein nutrition of Holstein-Kholmogory cows by periods of the physiological cycle. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Izvestiya Saint-Petersburg State Agrarian University. 2017;(48):58-63. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30383540>
5. Korchagina Yu. A. Modern approaches to a protein feeding of high-yielding cows. *Vestnik APK Verkhnevolzh'ya* = Bulletin of the AIC of the Upper Volga. 2019;(3):91-93. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/pduvov>
6. Shlyakhova O. G. Protein nutrition of highly productive cows during the transition period: monograph. Krasnodar: *Kubanskiy GAU imeni I. T. Trubilina*, 2019. 139 p. URL: <https://e.lanbook.com/book/223946>
7. Ryadchikov V. G., Soldatov A. A., Kharitonov E. L., Shlyakhova O. G., Tantavi A., Komarova N. S. The disintegration of feed protein is an important factor in the efficiency of nitrogen use and milk productivity of lactating cows. *Effektivnoe zhivotnovodstvo*. 2019;(3(151)):42-48. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=39454369>
8. Volgin V. I., Romanenko L. V., Prokhorenko P. N. Adequate feeding of dairy cattle is the basis for realizing the genetic potential of productivity. Moscow: *RAN*, 2018. 258 p.

9. Sharipov D. R., Yakimov O. A., Galimullin I. Sh. Influence of neutral detergent fiber in the ration on dry matter consumption, milk productivity and rumination activity of cows in first phase of lactation. *Uchenye zapiski Kazanskoy gosudarstvennoy akademii veterinarnoy meditsiny im. N. E. Bauman* = Scientific Notes Kazan Bauman State Academy of Veterinary Medicine. 2019;240(4):201-205. (In Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.31588/2413-4201-1883-240-4-201-205>

10. Kuzmina L. N., Kartashova A. P., Korbut O. V., Kuzmin S. S. The role of structural carbohydrates in feeding of cows in the conditions of the European North. *Veterinariya i kormlenie*. 2022;(6):44-46. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30917/ATT-VK-1814-9588-2022-6-11>

11. Kosolapov A. V. Nutrient digestibility and nitrogen balance for high-productive cows fed by polysaccharides. *Kormoproizvodstvo* = Forage Production. 2017;(4):30-33. (In Russ.).

URL: https://kormoproizvodstvo.ru/arhiv_nomerov/arxiv-statej-doi/perevarimost-pitatelnyx-veshhestv-i-balans-azota-u-vysokoproduktivnyx-korov-pri-vvedenii-v-racion-polisaxaridov

12. Filinskaya O. V., Kevorkyan S. A. Practical methods of controlling the usefulness of feeding highly productive cows in the modern complex. *Vestnik APK Verkhnevolzh'ya* = Bulletin of the AIC of the Upper Volga. 2018;(4(44)):30-36. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36813748>

13. Fustini M., Palmonari A., Canestrari G., Bonfante E., Mammi L., Pacchioli M. T., Sniffen G. C. J., Grant R. J., Cotanch K. W., Formigoni A. Effect of undigested neutral detergent fiber content of alfalfa hay on lactating dairy cows: Feeding behavior, fiber digestibility, and lactation performance. *Journal of Dairy Science*. 2017;100(6):4475-4483. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2016-12266>

14. Van Soest P. J., Robertson J. B., Lewis B. A. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of Dairy Science*. 1991;74(10):3583-3597.

DOI: [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(91\)78551-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(91)78551-2)

15. Ganushchenko O. Fibre in ruminant diets. *Zhivotnovodstvo Rossii*. 2019;(10):37-42. (In Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.25701/ZZR.2019.72.82.010>

16. Raffrenato E., Fievisohn R., Cotanch K. W., Grant R. J., Chase L. E., Van Amburgh M. E. Effect of lignin linkages with other plant cell wall components on in vitro and in vivo neutral detergent fiber digestibility and rate of digestion of grass forages. *Journal of Dairy Science*. 2017;100(10):8119-8131. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2016-12364>

Сведения об авторах

Кузьмина Людмила Николаевна, старший научный сотрудник лаборатории научного обеспечения сельскохозяйственного производства, ФГБНУ «Мурманская государственная сельскохозяйственная опытная станция», ул. Совхозная, д. 1, п. Молочный, Кольский р-н, Мурманская обл., Российская Федерация, 184365, e-mail: research-station@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3618-0977>

✉ **Карташова Анастасия Петровна**, кандидат с.-х. наук, исполняющий обязанности директора, ФГБНУ «Мурманская государственная сельскохозяйственная опытная станция», ул. Совхозная, д. 1, п. Молочный, Кольский р-н, Мурманская обл., Российская Федерация, 184365, e-mail: research-station@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3144-2816>

Кузьмин Сергей Сергеевич, младший научный сотрудник лаборатории научного обеспечения сельскохозяйственного производства, ФГБНУ «Мурманская государственная сельскохозяйственная опытная станция», ул. Совхозная, д. 1, п. Молочный, Кольский р-н, Мурманская обл., Российская Федерация, 184365, e-mail: research-station@yandex.ru

Information about the authors

Lyudmila N. Kuzmina, senior researcher, the Laboratory for Scientific Support of Agricultural Production, Murmansk State Agricultural Experimental Station, Sovhoznaya str., 1, Molochniy, Kolskiy district, Murmansk region, Russian Federation, 184365, e-mail: research-station@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3618-0977>

✉ **Anastasia P. Kartashova**, PhD in Agricultural Science, Acting Director, Murmansk State Agricultural Experimental Station, Sovhoznaya str., 1, Molochniy, Kolskiy district, Murmansk region, Russian Federation, 184365, e-mail: research-station@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3144-2816>

Sergey S. Kuzmin, junior researcher, the Laboratory for Scientific Support of Agricultural Production, Murmansk State Agricultural Experimental Station, Sovhoznaya str., 1, Molochniy, Kolskiy district, Murmansk region, Russian Federation, 184365, e-mail: research-station@yandex.ru

✉ – Для контактов / Corresponding author

Эффективность скармливания холина в «защищенной» форме в послемолочный период выращивания телят

© 2023. В. Н. Романов ✉, А. В. Мишуров, Д. А. Никанова

ФГБНУ «Федеральный научный центр животноводства – ВИЖ имени академика Л. К. Эрнста», пос. Дубровицы, Московская область, Российская Федерация

Изучали физиологическое и продуктивное действие разработанной «защищенной» формы холина в рационах телят в послемолочный период выращивания. Телочки аналоги по породе, живой массе в трехмесячном возрасте были разбиты на 2 группы ($n = 10$) и получали рационы при групповом беспривязном содержании. Животным опытной группы ежедневно к основному рациону задавали минигранулы «защищенного» холина из расчета 50 мг/кг живой массы активного вещества в смеси с комбикормом в течение 90 дней с изучением последействия. За 90 дней скармливания добавки дополнительный прирост живой массы животных контрольной группы составил $67,1 \pm 0,5$ кг, опытной – $77,5 \pm 1,2$ кг, при среднесуточных приростах живой массы $745,5 \pm 0,01$ г против $861,1 \pm 0,40$ г ($p \leq 0,05$), за 30 дней последействия – $733,3 \pm 0,03$ г против $836,7 \pm 0,09$ г соответственно. Ускорение роста телочек взаимосвязано с улучшением направленности метаболических процессов в их организме вследствие применения добавки. В сыворотке крови, взятой в конце опыта, установлен более высокий уровень: общего белка – на 6,3 % ($p \leq 0,05$); альбуминов – на 8,0 % ($p \leq 0,05$); креатина – на 7,4 % ($p \leq 0,05$); глюкозы – на 21,2 % ($p \leq 0,05$); триглицеридов – на 28,0 % ($p \leq 0,05$); холестерина на – 10,2 % ($p \leq 0,05$); щелочной фосфатазы – на 7,6 %, при более низких уровнях мочевины – на 22,8 % ($p \leq 0,05$) и билирубина – на 23,8 % ($p \leq 0,05$). По гематологическим показателям увеличились уровни образования эритроцитов – на 8,0 % ($p \leq 0,05$), гемоглобина – на 5,2 %, показателя гематокрита – на 19,5 %, снизился на 13,4 % уровень лейкоцитов. Также установлено положительное влияние на иммунный статус организма растущих животных – уровень бактерицидной активности сыворотки крови увеличился на 4,1 %, повысились уровни лизоцима (на 50,0 %) ($p \leq 0,05$), фагоцитарной активности на 1,0 абс. %, фагоцитарного индекса на 14,5 %, фагоцитарного числа на 17,5 %. Полученные данные свидетельствуют о целесообразности применения холина в «защищенной» форме в рационе телок КРС.

Ключевые слова: биохимия крови, гематология, резистентность, живая масса

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный научный центр животноводства – ВИЖ имени академика Л. К. Эрнста» (тема № FGGN 0445-2021-0002).

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Романов В. Н., Мишуров А. В., Никанова Д. А. Эффективность скармливания холина в «защищенной» форме в послемолочный период выращивания телят. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2023;24(5):830-838. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.5.830-838>

Поступила: 27.06.2023

Принята к публикации: 11.10.2023

Опубликована онлайн: 30.10.2023

The effectiveness of feeding choline in a "protected" form in the post-dairy period of calf rearing

© 2023. Viktor N. Romanov ✉, Aleksey V. Mishurov, Darya A. Nikanova

L. K. Ernst Federal Science Center for Animal Husbandry, Dubrovitsy, Moscow Region, Russian Federation

The physiological and productive effect of the developed "protected" form of choline in calves' diets after removing them from milk drinking was studied. Heifers analogs by breed, live weight at the age of three months were divided into 2 groups ($n = 10$), and received rations by group loose housing system. The animals of the experimental group were daily given minigranules of "protected" choline at the rate of 50 mg/kg of live weight of the active substance mixed with feed for 90 days, with the study of the aftereffect. For 90 days of feeding the supplement, the additional increase in live weight of animals in the control group was 67.1 ± 0.5 kg, in the experimental group – 77.5 ± 1.2 kg, with an average daily increase in live weight of 745.5 ± 0.01 g versus 861.1 ± 0.40 g ($p \leq 0.05$), for 30 days of aftereffect, respectively, 733.3 ± 0.03 g versus 836.7 ± 0.09 g. The acceleration of the growth of heifers is interconnected with the improvement of the direction of metabolic processes in their body due to the use of an additive. In the blood serum taken at the end of the experiment, there was noted a higher level of total protein – by 6.3 % ($p < 0.05$); albumins by 8.0 % ($p < 0.05$); creatine – by 7.4 % ($p < 0.05$); glucose (by 21.2 %) ($p < 0.05$); triglycerides by 28.0 % ($p < 0.05$); cholesterol by 10.2 % ($p < 0.05$); alkaline phosphatase by 7.6 %, at lower urea levels, by 22.8 % ($p < 0.05$), and bilirubin by 23.8 % ($p < 0.05$). According to hematological indicators, higher levels of erythrocyte formation were revealed – by 8.0 % ($p < 0.05$); hemoglobin by 5.2 %; hematocrit index (by 19.5 %), with a lower (by 13.4 %) white blood cell level. A positive effect on the immune status of the organism of growing animals was also found, with a positive difference in the bactericidal activity of blood serum by 4.1 %, a higher level of lysozyme (by 50.0 %) ($p \leq 0.05$), phagocytic activity by 1.0 absolute%, phagocytic index by 14.5 %, phagocytic number by 17.5 %. The data obtained prove the relevance of giving choline in "protected" form to growing ruminants.

Keywords: blood biochemistry, hematology, resistance, live weight

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 L. K. Ernst Federal Science Center for Animal Husbandry (theme no. FGGN 0445-2021-0002).

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

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

For citation: Romanov V. N., Mishurov A. V., Nikanova D. A. The effectiveness of feeding choline in a "protected" form in the post-dairy period of calf rearing. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2023;24(5):830-838. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.5.830-838>

Received: 14.03.2023

Accepted for publication: 11.10.2023 Published online: 30.10.2023

Для формирования животных с высокой продуктивностью целесообразно применение способов направленной физиологической коррекции метаболических процессов, протекающих в организме телят как в различные периоды выращивания, так и в периоды технологических стрессов [1, 2, 3].

При важной биологической роли в тканевых обменных процессах реакций переметилирования выявлено прямое липотропное, антиоксидантное, антитоксическое, иммуномодулирующее действие холина¹ [4, 5]. Получены исследовательские данные, свидетельствующие о высокой эффективности применения «защищенной» формы холина жвачным животным [6]. При установленной целесообразности скармливания биологически активных соединений, в частности источников метилирующих агентов – метионина [7, 8, 9], карнитина [10], в «защищенных» от опосредованного воздействия симбиотной микрофлоры формах, с более полным их поступлением и всасыванием в кишечник и, непосредственно, в печень.

Полученные данные согласуются с результатами исследований зарубежных ученых о физиологическом и продуктивном действии скармливания высокопродуктивному молочному скоту как «защищенных» форм метилирующих агентов, в частности метионина [11, 12, 13], так и ряда других аминокислот [14, 15]. Учитывая, что холин нормируется в рационах растущего молодняка за рубежом, а информации в отечественных источниках литературы по обогащению рационов телят холином не выявлено, данное направление исследований представляет несомненный научно-практический интерес.

При относительной взаимозаменяемости источников метилирующих агентов, представляемых в настоящее время в основном дорогостоящими зарубежными кормовыми продуктами, встает необходимость разработки их импортозамещения. В отличие от зарубежных

компонентов защиты нами использовались животные жиры (в смеси с диоксидом кремния), температура плавления которых выше, чем температура в рубце жвачных животных. В предварительных физиологических исследованиях, проведенных на модельных жвачных животных, имеющих фистулы рубца, при сравнительном изучении эффективности использования нативной и «защищенной» форм холина относительно контроля, установлено более выраженное положительное влияние на углеводно-жировую и белковый обмен, отложение азота в теле именно разработанной формы, что предполагает и высокое продуктивное действие² [16].

Цель исследований – определение эффективности применения разработанного кормового продукта (холин в «защищенной» форме) телятам в послемолочный период выращивания.

В задачи входило изучить:

- интенсивность роста телят при скармливании кормовой добавки в течение 90 дней опыта и через 30 дней последствий;
- состояние обмена веществ и показателей резистентности у подопытных животных в середине и конце опыта.

Научная новизна – при целесообразности применения биологически активных соединений жвачным животным в «защищенных» от опосредованного воздействия симбионтов преджелудков видах и необходимости импортозамещения впервые проведены исследования на растущем молодняке крупного рогатого скота разработанной отечественной кормовой добавки холина. Представленные материалы являются одним из этапов изучения физиологического и продуктивного действия «защищенной» формы холина в направлении разработки фундаментальных основ обеспечения биологически полноценным питанием организма высокопродуктивных коров и раскрытия их генетического потенциала.

¹Циеленс Э. А. Метаболизм холина и реакции переметилирования. Рига: Знание, 1971. 368 с.

²Заявка на патент № 2023106829 от 22.03.2023 г.

Материал и методы. Научно-хозяйственный опыт общей длительностью 120 дней (90 дней основной, 30 последствия) проводили в условиях сельскохозяйственного предприятия АО «Молоди» Чеховского района Московской области на телочках голштинизированной черно-пестрой породы при групповом беспривязном их содержании в летний период выращивания. Животные после снятия с выдойки молока в трехмесячном возрасте были сформированы в две группы по 10 голов в каждой.

Животные контрольной группы потребляли основной общехозяйственный рацион, состоящий из комбикорма, сена, трав зеленого конвейера, соответствующий разработанным нормам энергетической и питательной ценности для данного возраста и высокой интенсивности роста.

Суточный рацион в возрасте четырех месяцев состоял: 1 л молока; 1,2 кг стартерного комбикорма; 1 кг зеленой массы; 1 кг сена; 0,02 кг соли; в возрасте пяти месяцев: 1,5 кг стартерного комбикорма; 2 кг зеленой массы; 1 кг сена; 0,02 кг соли; в возрасте шести месяцев: 1,8 кг стартерного комбикорма; 3 кг зеленой массы; 1 кг сена; 0,02 кг соли.

Животные опытной группы в первый месяц исследований получали в сутки на голову 2 г активного вещества холина в «защищенном» гранулированном виде (8 г кормового продукта) в смеси с комбикормом. Во второй месяц опыта суточная доза составляла 11 г, в третий месяц – 14 г, исходя из перерасчета скармливания 1 г активного вещества холина на 50 кг живой массы.

Для изучения показателей обменных процессов в организме ($n = 5$) проводили биохимический анализ крови, взятой через 1,5 месяца, по окончании опыта и через 3 часа после кормления. Определяли содержание общего белка, альбуминов, глобулинов, креатинина, мочевины, билирубина общего, холестерина общего, щелочной фосфатазы, глюкозы, АСТ, АЛТ, триглицеридов, кальция, фосфора и гематологических (гемоглобин, эритроциты, лимфоциты, гематокрит) на биохимическом автоматическом анализаторе ErbaXL-640 (Erba-Lachema, Чехия, с использованием реагентов Erba) в отделе физиологии и биохимии с.-х. животных ФУБНУ ВИЖ имени Л. К. Эрнста. Прибор калибруется по имеющимся стандартам и поверяется при каждой загрузке аналитического материала. Определение гематологических показателей проводили кондуктометрическим методом измерения для подсчета

общего количества клеток, гемоглобин определяли фотометрическим методом.

Изучение неспецифического и клеточного иммунитета крови животных проводили в лаборатории микробиологии ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л. К. Эрнста по модифицированным методикам. Бактерицидную и лизоцимную активность сыворотки крови определяли фотонейлометрическим методом, основанным на разнице оптической плотности мясопептонного бульона с тест-культурой бактерий.

Полученные в опыте материалы обработаны с вычислением среднеарифметической (M), среднеквадратической ошибки ($\pm m$) и уровня значимости (p). Результаты исследований считаются высокостатистическими при $p \leq 0,001$ и достоверными при $p \leq 0,01$ и $p \leq 0,05$.

Результаты и их обсуждение. Проведенные исследования охватывают сложный возрастной период для растущего организма, во взаимосвязях с морфофункциональной перестройкой пищеварительного аппарата к характерному для жвачных животных желудочно-кишечному типу пищеварительной деятельности.

Основной средневзвешенный рацион телят представлен в таблице 1.

В период проведения эксперимента животные обеих групп были здоровыми, и полученные биохимические и гематологические показатели крови находились в пределах допустимых референтных значений.

Выявлены не только определенные тенденции, но и существенная разница в показателях обменных процессов в организме животных, получавших кормовую добавку «защищенной» формы холина уже через 45 дней скармливания (табл. 2).

Так, по азотистому обмену, при общей положительной разнице в уровне концентрации общего белка (на 3,7 %), увеличился уровень альбуминов (на 5,5 %) ($p \leq 0,05$), глобулинов (на 2,4 %), А/Г соотношение составило 0,72 против 0,70 в контроле. О лучшем течении азотистого обмена свидетельствуют и более низкие (на 17,3 %) показатели уровня мочевины, при повышенном уровне креатинина (на 5,3 %), как продукта распада белка, образующегося в мышцах, характеризующего определенным образом не только объем мышечной массы, но и участвующего в энергетическом обмене тканей организма. Активность ферментов переаминирования была сравнительно одинакова, как и коэффициент де Ритиса.

Таблица 1 – Основной средневзвешенный рацион телят (n = 10) /

Table 1 – Basic weighted average diet of calves (n = 10)

<i>Показатель / Indicator</i>	<i>Контрольная группа / Control group</i>	<i>Опытная группа / Experimental group</i>
Сено злаково-бобовое, г / Grain-legume hay, g	1000	1000
Зеленая масса, г / Green mass, g	2000	2000
Стартерный комбикорм, г / Starter compound feed, g	1500	1500
Кормовая добавка (холин в «защищенной» форме), г / Feed additive (Choline in a "protected" form), g	-	11
Соль поваренная, г / Table salt, g	20	20
<i>В рационе содержится / The diet contains:</i>		
ЭКЕ / Energy Feed Units	2,78	2,79
Обменная энергия, МДж / Exchange energy, MJ	27,76	27,97
Сухое вещество, г / Dry matter, g	2535,0	2551,3
Сырой протеин, г / Crude protein, g	444,0	447,7
Сырая клетчатка, г / Crude fiber, g	488,0	491,2
Сырой жир, г / Crude fat, g	80,0	85,4
Кальций, г / Ca, g	24,6	24,6
Фосфор, г / P, g	14,0	14,0

Таблица 2 – Влияние скармливания холина в «защищенной» форме на биохимические показатели крови телят через 1,5 месяца опыта (n = 5) /

Table 2 – The effect of feeding choline in a "protected" form on the biochemical parameters of calves' blood after 1.5 months of the experiment (n = 5)

<i>Показатель / Indicator</i>	<i>Контрольная группа / Control group</i>	<i>Опытная группа / Experimental group</i>	<i>% контролю / % to control</i>
Общий белок, г/л / Total protein, g/l	66,78±1,16	69,25±0,57	103,7
Альбумины, г/л / Albumin (A), g/l	27,54±0,14	29,05±0,26*	105,5
Глобулины, г/л / Globulin (G), g/l	39,24±1,12	40,20±0,68	102,4
А/Г / A/G	0,70±0,02	0,72±0,02	-
Мочевина, ммоль/л / Urea, mmol/l	3,12±0,14	2,58±0,21	82,7
Креатинин, мкм/л / Creatinine, µmol/l	98,68±0,91	103,90±1,25*	105,3
Глюкоза, ммоль/л / GLU	3,17±0,42	4,32±0,25*	136,3
Щелочная фосфатаза, МЕ/л / ALP, U/L	170,60±2,22	182,00±4,30*	106,7
АЛТ, МЕ/л / ALT, IU/L	26,39±0,16	27,26±0,32	103,3
АСТ, МЕ/л / AST, IU/L	66,93±0,41	65,21±0,66	97,4
Коэффициент де Ритиса АСТ/АЛТ / AST/ALT	2,64±0,12	2,68±0,16	-
Билирубин общий, ммоль/л / Bilirubin, µmol/l	1,59±0,12	1,26±0,10	79,2
Триглицериды, ммоль/л / Triglycerides, mmol/l	0,25±0,01	0,31±0,02*	124,0
Холестерин, ммоль/л / Cholesterol, mmol/l	2,82±0,11	3,06±0,06	108,5
Кальций, ммоль/л / Ca, mmol/l	2,76±0,05	2,82±0,02	102,2
Фосфор, ммоль/л / P, mmol/l	2,20±0,05	2,29±0,04	104,1
Ca/P	1,25±0,01	1,23±0,103	98,4
Магний, ммоль/л / Mg, mmol/l	0,80 ±0,02	0,85±0,02	106,3
Железо, мкм/л / Fe, µmol/l	26,84±1,51	28,16±1,46	104,9
Хлориды, мм/л / Chlorides, mM/l	105,60±1,05	107,50±0,41	101,2

*Достоверно при p≤0,05/ Reliable at p≤0.05

Свидетельством улучшения энергетического обмена в организме растущих животных является уровень глюкозы, составивший у животных опытной группы 4,32, контрольной – 3,17 ммоль/л (выше на 36,3 % ($p \leq 0,05$), и показатель щелочной фосфатазы 182,0 МЕ/л и 170,60 МЕ/л ($p \leq 0,05$) соответственно.

Выявленный низкий уровень билирубина (на 20,8 %) при увеличенных уровнях холестерина (на 8,5 %) и триглицеридов (на 24,0 %) ($p \leq 0,05$) характеризуют более высокий уровень функциональной деятельности печени, при известном липотропно-гепатопротекторном действии холина.

Таблица 3 – Влияние скармливания холина в «защищенной» форме на гематологические показатели крови телят через 1,5 месяца опыта (n = 5) /

Table 3 – The effect of feeding choline in a "protected" form on the hematological blood parameters of calves after 1.5 months of the experiment (n = 5)

Показатель / Indicator	Контрольная группа / Control group	Опытная группа / Experimental group	% к контролю / % to control
Эритроциты, 10^{12} /л / RBC	12,19 $\pm$ 0,20	13,39 $\pm$ 0,34*	109,8
Лейкоциты, 10^9 /л / WBC	18,88 $\pm$ 0,52	15,87 $\pm$ 1,39	84,1
Гемоглобин, г/л / HGB	96,11 $\pm$ 1,10	101,40 $\pm$ 2,65	105,5
Гематокрит, % / HCT	39,27 $\pm$ 1,98	44,04 $\pm$ 2,90	+4,77

*Достоверно при $p \leq 0,05$ / Reliable at $p \leq 0,05$

В совокупности с более высоким (на 9,8 %) ($p \leq 0,05$) уровнем эритроцитов данные показатели также характеризуют улучшение функциональной деятельности печени, при ее важной роли в кроветворении. Установлено, что применение холина способствует уменьшению (на 15,9 %) уровня лейкоцитов в крови относительно контроля.

Выявленные тенденции, причем с более выраженной разницей в ряде показателей, характеризующих метаболические процессы в организме растущих животных, получавших «защищенную» форму холина, проявились в конце эксперимента (табл. 4).

Состояние белкового обмена в опытной группе характеризовалось повышением уровня общего белка на 6,3 % ($p \leq 0,05$), концентрации альбуминов на 8,0 % ($p \leq 0,05$), повышением фракции глобулинов на 5,1 %, увеличением соотношения А/Г до 0,73 относительно контроля. Снижение уровня концентрации мочевины на 22,8 % ($p \leq 0,05$) и повышение уровня креатина на 7,4 % ($p \leq 0,05$) характеризуют, как правило, активизацию белкового обмена и обуславливают повышение роста мышечной ткани при одновременном снижении катаболизма белков в организме животных, получавших добавку.

По минеральному обмену значительных различий в показателях не выявлено, при тенденции более высокого содержания у животных опытной группы кальция на 2,2 %, фосфора – на 4,1 %, магния – на 6,3 %, с известной ролью последнего в нормализации работы пищеварительной системы, усвоении белков, жиров и углеводов, укреплении костной ткани, участии в формировании иммунитета.

Увеличение уровня железа (на 4,9 %) в сыворотке крови взаимосвязано с уровнем гемоглобина, содержание которого в опытной группе животных, получавших холин, составило 101,40 г/л против 96,11 г/л в контроле (табл. 3).

Более высокие уровни глюкозы (на 21,2 %) ($p \leq 0,05$), щелочной фосфатазы на 7,6 %, как важнейших показателей энергетического обмена, при улучшении показателей липидного, достоверных повышений уровня триглицеридов на 28,0 % ($p \leq 0,05$), холестерина – на 10,2 % ($p \leq 0,05$) и уменьшении билирубина на 23,8 % ($p \leq 0,05$), являются ярким свидетельством положительного действия «защищенного» холина, поступающего непосредственно в печень, с подтверждением имеющихся научных данных о липотропном его действии [1].

В обмене минеральных веществ значительной разницы не выявлено, при некотором увеличении уровня железа (на 6,8 %) в организме опытных животных, получавших холин, относительно контроля.

О положительном действии холина в «защищенной» форме свидетельствуют и данные гематологических показателей крови (табл. 5).

Выявлено увеличение уровней образования эритроцитов – на 8,0 % ($p \leq 0,05$), гемоглобина – на 5,2 %, показателя гематокрита – на 9,5 %, при снижении на 13,4 % уровня лейкоцитов.

Выявлено положительное действие добавки на показатели неспецифического иммунитета растущих животных (табл. 6).

**ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ: КОРМОПРОИЗВОДСТВО.
КОРМЛЕНИЕ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЖИВОТНЫХ /
ORIGINAL SCIENTIFIC ARTICLES: FODDER PRODUCTION. LIVESTOCK FEEDING**

Таблица 4 – Влияние скармливания холина в «защищенной» форме на биохимические показатели крови телят в конце опыта (n = 5) /

Table 4 – The effect of feeding choline in a "protected" form on the biochemical parameters of calves' blood at the end of the experiment (n = 5)

Показатель / Indicator	Контрольная группа / Control group	Опытная группа / Experimental group	% к контролю / % to control
Общий белок, г/л / Total protein, g/l	66,91±1,20	71,12±0,81*	106,3
Альбумины, г/л / Albumin (A), g/l	27,80±0,24	30,03±0,48*	108,0
Глобулины, г/л / Globulin (G), g/l	39,11±1,05	41,09±0,55	105,1
А/Г / A/G	0,71±0,02	0,73±0,01	-
Мочевина, ммоль/л / Urea, mmol/l	3,03±0,13	2,34±0,14*	77,2
Креатинин, мкм/л / Creatinine, μmol/l	98,29±2,44	105,60±1,90*	107,4
Глюкоза, ммоль/л / GLU	3,12±0,05	3,78±0,11*	121,2
Щелочная фосфатаза, МЕ/л / ALP, U/L	173,80±1,80	187,00±4,64*	107,6
АЛТ, МЕ/л / ALT, IU/L	26,90±0,45	28,04±1,12	104,2
АСТ, МЕ/л / AST, IU/L	66,28±0,34	65,50±1,16	98,8
Коэффициент де Ритиса АСТ/АЛТ / AST/ALT	2,57±0,14	2,44±0,19	-
Билирубин общий, ммоль/л / Bilirubin, μmol/l	1,72±0,12	1,31±0,13*	76,2
Триглицериды, ммоль/л / Triglycerides, mmol/l	0,25±0,02	0,32±0,02*	128,0
Холестерин, ммоль/л / Cholesterol, mmol/l	2,84±0,13	3,13±0,04*	110,2
Кальций, ммоль/л / Ca, mmol/l	2,75±0,05	2,82±0,03	102,5
Фосфор, ммоль/л / P, mmol/l	2,26±0,06	2,28±0,05	100,9
Ca/P	1,22±0,05	1,24±0,03	-
Магний, ммоль/л / Mg, mmol/l	1,08 ±0,05	1,09±0,07	100,9
Железо, мкм/л / Fe, μmol/l	25,28±1,68	27,01±2,79	106,8
Хлориды, мм/л / Chlorides, mM/l	104,60±0,54	104,20±1,02	99,6

*Достоверно при $p \leq 0,05$ / Reliable at $p \leq 0,05$

Таблица 5 – Влияние скармливания холина в «защищенной» форме на гематологические показатели крови телят в конце опыта (n = 5) /

Table 5 – The effect of feeding choline in a "protected" form on the hematological blood parameters of calves at the end of the experiment (n = 5)

Показатель / Indicator	Контрольная группа / Control group	Опытная группа / Experimental group	% к контролю / % to control
Эритроциты, 10^{12} /л / RBC	11,98±0,16	12,94±0,29*	108,0
Лейкоциты, 10^9 /л / WBC	19,66±1,77	17,03±0,56	86,6
Гемоглобин, г/л / HGB	95,67±3,04	100,60±2,34	105,2
Гематокрит, % / HCT	40,41±2,21	44,25±1,18	+3,84

*Достоверно при $p \leq 0,05$ / Reliable at $p \leq 0,05$

Таблица 6 – Влияние скармливания холина в «защищенной» форме на показатели неспецифической резистентности организма телят в конце опыта (n = 4) /

Table 6 – The effect of feeding choline in a "protected" form on the indicators of nonspecific resistance of the body of calves at the end of the experiment (n = 4)

Показатель / Indicator	Контрольная группа / Control group	Опытная группа / Experimental group	% к контролю / % to control
БАСК, % / Bactericidal activity, %	45,8±1,37	49,9±1,49	+4,1
Лизоцим, мкг / мл / Lysozyme, μg/ml	0,32±0,04	0,48±0,03*	150,0
Уд.ед.а., ед.а./мг белка / Ud.ed.a., ed.a./mg of protein	1,83±0,04	2,0±0,21	109,3
ФА, % / Phagocytic activity, %	49,3±0,93	50,3±0,93	+1
ФИ / Phagocytic index	3,38±0,29	3,87±0,04	114,5
ФЧ / Phagocytic number	1,66±0,11	1,95±0,04*	117,5

*Достоверно при $p < 0,05$ / Reliable at $p < 0,05$

По показателям естественной резистентности установлена положительная разница в бактерицидной активности сыворотки крови на 4,1 % при значительном увеличении уровня лизоцима (на 50,0 %) ($p \leq 0,05$), фагоцитарной активности – на 1,0 абс.%, фагоцитарного индекса – на 14,5 %, фагоцитарного числа – на 17,5 %, что в целом свидетельствует о продуктивном влиянии экзогенного применения холина на иммунологический статус организма растущих животных.

Положительные изменения в направленности обменных процессов в организме сопровождались ускорением роста животных. При

сравнительно одинаковой постановочной живой массе животных контрольной и опытной групп через месяц после начала эксперимента животные в контроле весили $88,1 \pm 6,6$ кг, в опыте – $89,9 \pm 2,5$ кг при среднесуточном приросте живой массы соответственно $740,0 \pm 0,01$ г и $870,0 \pm 0,02$ г ($p \leq 0,05$). На втором месяце эти значения в контроле составили $110,3 \pm 6,6$ кг и $740,0 \pm 0,01$ г, в опыте – $116,0 \pm 2,0$ кг и $870,0 \pm 0,02$ г ($p \leq 0,01$), на третьем $133,0 \pm 6,4$ кг и $756,7 \pm 0,02$ г против $142,8 \pm 2,4$ кг и $893,3 \pm 0,02$ г ($p \leq 0,01$) соответственно (рис. 1).

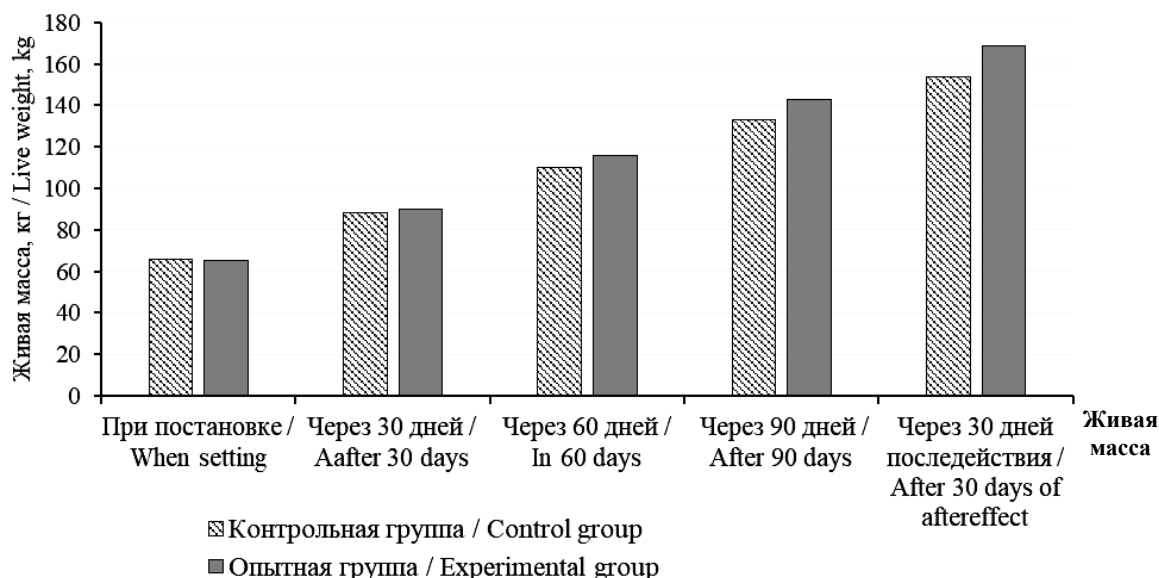


Рис. 1. Влияние скармливания холина в «защищенной» форме на динамику роста живой массы телят, кг (n = 10) /

Fig. 1. The effect of feeding choline in a "protected" form on the dynamics of the growth of live weight of calves, kg (n = 10)

За 90 дней опыта дополнительный прирост живой массы животных контрольной группы составил $67,1 \pm 0,5$ кг, опытной – $77,5 \pm 1,2$ кг при среднесуточных приростах живой массы соответственно $745,5 \pm 0,01$ г против $861,1 \pm 0,40$ г ($p \leq 0,05$), увеличение составило 15,5 %.

Положительные тенденции в интенсивности роста телят сохранились и после отмены добавки, через 30 дней последействия в опытной группе среднесуточный прирост составил $836,7 \pm 0,09$ г против $733,3 \pm 0,03$ г в контроле (увеличение на 14,1 %).

Заключение. Следует считать установленной высокую эффективность применения в рационах телят в послемолочный период в трехмесячном возрасте разработанную форму холина, задаваемую в расчетной дозе 50 мг/кг живой массы, в первый, второй и третий

месяцы опыта соответственно 8, 11 и 14 г кормового продукта к основному хозяйственному рациону.

Выявлено положительное действие добавки на направленность белкового и углеводно-жирового обмена в организме телят, проявленное в биохимических и гематологических показателях крови, взятой через 1,5 месяца опыта, с более выраженной разницей через 3 месяца скармливания. Установлен более высокий уровень общего белка в сыворотке крови до 6,3 % ($p \leq 0,05$), концентрации альбуминов до 8,0 % ($p \leq 0,05$) и креатина – до 7,4 % ($p \leq 0,05$), при более низкой концентрации мочевины – до 22,8 % ($p \leq 0,05$). В показателях углеводно-жирового обмена выявлен повышенный уровень глюкозы (до 21,2 %) ($p \leq 0,05$), триглицеридов на 28,0 % ($p \leq 0,05$), холестерина на 10,2 % ($p \leq 0,05$), щелочной

фосфатазы на 7,6 %, при более низком – до 23,8 % ($p \leq 0,05$) уровне билирубина.

Установлено увеличение уровня образования эритроцитов – на 8,0 % ($p \leq 0,05$), гемоглобина на 5,2 %, показателя гематокрита – на 9,5 %, при снижении (на 13,4 %) уровня лейкоцитов.

В показателях неспецифического иммунитета выявлено увеличение по бактерицидной активности сыворотки крови (на 4,1 %), уровню лизоцима (на 50,0 %) ($p \leq 0,05$), фагоцитарной активности на 1,0 абс.%, фагоцитарного индекса на 14,5 %, фагоцитарного числа на 17,5 %.

Положительная направленность метаболических процессов в организме под действием

добавки обусловила ускорение роста телят без отрицательного последствия. За 90 дней опыта дополнительный прирост живой массы животных контрольной группы составил $67,1 \pm 0,5$ кг, опытной – $77,5 \pm 1,2$ кг при среднесуточных приростах соответственно $745,5 \pm 0,01$ г и $861,1 \pm 0,40$ г ($p \leq 0,05$), за 30 дней последствия в опытной группе среднесуточный прирост составил $836,7 \pm 0,09$ г, в контроле – $733,3 \pm 0,03$ г.

Полученные данные свидетельствуют о целесообразности применения холина в «защищенной» от опосредованного воздействия симбиотной микрофлоры преджелудков форме растущим жвачным животным.

Список литературы

1. Алиев А. А. Обмен веществ у жвачных животных. М.: НИЦ Инженер, 1997. 420 с.
2. Романов В. Н., Воробьева С. В., Девяткин В. А. Оптимизация пищеварительных и обменных процессов в организме крупного рогатого скота с применением биологически активных веществ. Достижения науки и техники АПК. 2013;(3):23-25. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18913310> EDN: PXWWRZ
3. Стресс и адаптация сельскохозяйственных животных в условиях индустриальных технологий. Ф. И. Фурдуй, Е. И. Штирбу, Ф. А. Струтинский [и др.]. Кишинев: Штиинца, 1992. 224 с.
4. Гулюшин С. Ю., Зернов Р. А. Доноры метильных групп – перспективные средства для профилактики хронических микотоксикозов. Сельскохозяйственная биология. 2011;46(2):21-31.
5. Дунн Н. Холин или бетаин: дискуссия на практике. Комбикорма. 2001;(5):53.
6. Чабаяев М. Г., Тютюнник С. И., Некрасов Р. В., Анисова Н. И., Перевозникова Е. В., Клементьева Ю. И. Продуктивность и обмен веществ у высокопродуктивных коров при обогащении комбикормов холином. Кормопроизводство. 2013;(9):40-41.
7. Айснер И. Защищенные аминокислоты в кормлении коров. Комбикорма. 2015;(3):73-75.
8. Двалишвили В., Кузина А. Защищенный метионин повышает продуктивность молодняка овец. Комбикорма. 2011;(6):90-91.
9. Кирилов М. П., Головин А. В., Грачев Д. М., Голосной О. Р. Защищенный метионин в кормлении высокопродуктивных коров. Животноводство России. 2002;(2):10-11.
10. Романов В. Н., Иванова Г. В., Боголюбова Н. В., Некрасов Р. В. Физиологическое действие кормовых добавок с «защищенным» L-карнитином. Научные основы производства ветеринарных биологических препаратов: мат-лы Междунар. научн.-практ. конф. Щелково, 2009. С. 534-540.
11. Broderick G. A., Stevenson M. J., Patton R. A. Effect of dietary protein concentration and degradability on response to rumen-protected methionine in lactating cows. Journal of Dairy Science. 2009;92(6):2719-2726. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2008-1277>
12. Kudrna V., Illek J., Marounek M., Nguyen Ngoc A. Feeding ruminally protected methionine to pre- and postpartum dairy cows: effect on milk performance, milk composition and blood parameters. Czech Journal of Animal Science. 2009;(54(9)):395-402. DOI: <https://doi.org/10.17221/1684-CJAS>
13. Yang W. R., Sun H., Wang Q. Y., Liu F. X., Yang Z. B. Effects of rumen-Protected methionine on dairy performance and amino acid metabolism in lactating cows. American Journal of Animal and Veterinary Sciences. 2010;(5(1)):1-7. DOI: <https://doi.org/10.3844/ajavsp.2010.1.7>
14. Giallongo F., Harper M., Oh J., Lopes J. C., Lappiere H., Patton R. A., Parys C., Shinzato I., Hristov A. N. Effects of rumen-protected methionine, lysine, and histidine on lactation performance of dairy cows. Journal of Dairy Science. 2016;99:4437-4452. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2015-10822>
15. Lee C., Hristov A., Cassidy T., Heyler K. S., Lappiere H., Varda G. A., de Veth M. J., Patton R. A., Parys C. Rumen-protected lysine, methionine, and histidine increase milk protein yield in dairy cows fed a metabolizable protein deficient diet. Journal of Dairy Science. 2012;95(10):6042-6056. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2012-5581>

References

1. Aliev A. A. Metabolism in ruminants. Moscow: NITs Inzhener, 1997. 420 p.
2. Romanov V. N., Vorobyova S. V., Devyatkin V. A. Optimization of digestive and metabolic processes in the cattle organism using bioactive compounds. Dostizheniya nauki i tekhniki APK = Achievements of Science and Technology of AICis. 2013;(3):23-25. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18913310>
3. Stress and adaptation of farm animals in the conditions of industrial technologies. F. I. Furduy, E. I. Shtirbu, F. A. Strutinskiy [et al.]. Kishinev: Shtiintsa, 1992. 224 p.

4. Gulyushin S. Yu., Zernov R. A. Methyl group donors - promising means for prevention of chronic mycotoxicosis. *Sel'skokhozyaystvennaya biologiya* = Agricultural Biology. 2011;46(2):21-31. (In Russ.).
5. Dunn N. Choline or betaine: debate in practice. *Kombikorma*. 2001;(5):53. (In Russ.).
6. Chabayev M. G., Tyutyunik S. I., Nekrasov R. V., Anisova N. I., Perevoznikova E. V., Klementyeva Yu. I. Productivity and metabolism of highly productive cows at the concentrated feeds' enrichment with choline. *Kormoproizvodstvo* = Forage Production. 2013;(9):40-41. (In Russ.).
7. Aysner I. Protected amino acids in cow feeding. *Kombikorma*. 2015;(3):73-75. (In Russ.).
8. Dvalishvili V., Kuzina A. Protected methionine increases the productivity of young sheep. *Kombikorma*. 2011;(6):90-91. (In Russ.).
9. Kirilov M. P., Golovin A. V., Grachev D. M., Golosnoy O. R. Protected methionine in feeding highly productive cows. *Zhivotnovodstvo Rossii*. 2002;(2):10-11. (In Russ.).
10. Romanov V. N., Ivanova G. V., Bogolyubova N. V., Nekrasov R. V. Physiological effect of feed additives with "protected" L-carnitine. Scientific basis for the production of veterinary biological preparations: Proceedings of the International. scientific-practical conf. Shchelkovo, 2009. pp. 534-540.
11. Broderick G. A., Stevenson M. J., Patton R. A. Effect of dietary protein concentration and degradability on response to rumen-protected methionine in lactating cows. *Journal of Dairy Science*. 2009;92(6):2719-2726. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2008-1277>
12. Kudrna V., Illek J., Marounek M., Nguyen Ngoc A. Feeding ruminally protected methionine to pre- and postpartum dairy cows: effect on milk performance, milk composition and blood parameters. *Czech Journal of Animal Scitnce*. 2009;(54(9)):395-402. DOI: <https://doi.org/10.17221/1684-CJAS>
13. Yang W. R., Sun H., Wang Q. Y., Liu F. X., Yang Z. B. Effects of rumen-Protected methionine on dairy performance and amino acid metabolism in lactating cows. *American Journal of Animal and Veterinary Sciences*. 2010;(5(1)):1-7. DOI: <https://doi.org/10.3844/ajavsp.2010.1.7>
14. Giallongo F., Harper M., Oh J., Lopes J. C., Lappiere H., Patton R. A., Parys C., Shinzato I., Hristov A. N. Effects of rumen-protected methionine, lysine, and histidine on lactation performance of dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 2016;99:4437-4452. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2015-10822>
15. Lee C., Hristov A., Cassidy T., Heyler K. S., Lappiere H., Varda G. A., de Veth M. J., Patton R. A., Parys C. Rumen-protected lysine, methionine, and histidine increase milk protein yield in dairy cows fed a metabolizable protein deficient diet. *Journal of Dairy Science*. 2012;95(10):6042-6056. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2012-5581>

Сведения об авторах

✉ **Романов Виктор Николаевич**, кандидат биол. наук, ведущий научный сотрудник отдела физиологии и биохимии сельскохозяйственных животных, ФГБНУ «Федеральный научный центр животноводства – ВИЖ имени академика Л. К. Эрнста», п. Дубровицы, д. 60, Городской округ Подольск, Московская область, Российская Федерация, 142132, e-mail: priemnaya-vij@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3542-5370>, e-mail: romanoff-viktor51@yandex.ru

Мишуров Алексей Владимирович, кандидат с.-х. наук, старший научный сотрудник отдела физиологии и биохимии сельскохозяйственных животных, ФГБНУ «Федеральный научный центр животноводства – ВИЖ имени академика Л. К. Эрнста», п. Дубровицы, д. 60, Городской округ Подольск, Московская область, Российская Федерация, 142132, e-mail: priemnaya-vij@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7382-1625>

Никанова Дарья Александровна, кандидат биол. наук, научный сотрудник отдела биотехнологии и молекулярной диагностики животных, лаборатория микробиологии, ФГБНУ «Федеральный научный центр животноводства – ВИЖ имени академика Л. К. Эрнста», п. Дубровицы, д. 60, Городской округ Подольск, Московская область, Российская Федерация, 142132, e-mail: priemnaya-vij@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5164-244X>

Information about the authors

✉ **Viktor N. Romanov**, PhD in Biological Science, leading researcher, the Department of Physiology and Biochemistry of Farm Animals, L. K. Ernst Federal Science Center for Animal Husbandry, Dubrovitsy village, 60, Podolsk City District, Moscow Region, Russian Federation, 142132, e-mail: priemnaya-vij@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3542-5370>, e-mail: romanoff-viktor51@yandex.ru

Aleksey V. Mishurov, PhD in Agricultural Science, senior researcher, the Department of Physiology and Biochemistry of Farm Animals, L. K. Ernst Federal Science Center for Animal Husbandry, Dubrovitsy village, 60, Podolsk City District, Moscow Region, Russian Federation, 142132, e-mail: priemnaya-vij@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7382-1625>

Darya A. Nikanova, PhD in Biological Science, researcher, the Department of Biotechnology and Molecular Diagnostics of Animals, the Laboratory of Microbiology, L. K. Ernst Federal Science Center for Animal Husbandry, Dubrovitsy village, 60, Podolsk City District, Moscow Region, Russian Federation, 142132, e-mail: priemnaya-vij@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5164-244X>

✉ – Для контактов / Corresponding author

<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.5.839-848>

УДК 636.082

Поиск генетических маркеров для селекционно-племенной работы, направленной на повышение массы поросят при рождении© 2023. Е. А. Романец , Т. С. Романец, О. Л. Третьякова, Л. В. Гетманцева
ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет», п. Персиановский, Российская Федерация

При интенсивном повышении признаков плодовитости свиноматок возникла проблема снижения массы поросят при рождении. В связи с этим, особую актуальность и научную значимость приобретает поиск генетических вариантов, связанных с массой поросят при рождении. Целью работы – на основе данных полногеномного генотипирования, используя метод *Fst*, идентифицировать генетические варианты, связанные с массой поросенка при рождении и протестировать их для выбора оптимальных генетических маркеров для селекционно-племенной работы, способствующей повышению воспроизводительной продуктивности свиней. Исследования проводили в 2020-2022 гг. на свиньях породы крупная белая ($n = 239$), разводимых в ЗАО «Племзавод-Юбилейный» Тюменской области. Генотипирование проводили с использованием GeneSeek® GGP Porcine HD Genomic Profiler v1 (Illumina Inc, США). Фильтрацию геномных данных провели в соответствии со следующими параметрами --geno 0.1, --mind 0.1, --maf 0.05, --hwe 1e-7, --indep-pairwise 50 5 0.8. Для идентификации геномных областей, связанных с массой поросят при рождении, использовали статистику *Fst*, путем сравнения генетических вариантов у свиней между двумя группами с высокими и низкими показателями. Значимыми вариантами считали те, у которых значения *Fst* превышали уровень квантиля 0,999. Для оценки значимости эффектов генотипов вариантов на массу поросят при рождении и количество поросят при рождении использовали критерий Стьюдента. Результаты показали, что между массой поросят при рождении и количеством поросят при рождении существует умеренная отрицательная связь ($-0,351$). Выявлено 17 SNP, связанных с массой поросят при рождении, 9 из которых локализованы в генах *KIF13A*, *STK24*, *FDFT1*, *ADGRD1*, *STX2*, *TMEM132D*, *ENSSSCG00000054866*, *ENSSSCG00000058459*, а также SNPs *rs81450496*, *rs80887103* в межгенных областях, были определены как перспективные генетические маркеры для повышения массы поросят при рождении. Полученные результаты могут быть использованы для создания отечественных селекционных технологий, способствующих повышению эффективности свиноводства.

Ключевые слова: свиньи, масса одного поросенка при рождении, SNP, *Fst*, геномные области, ген**Благодарности:** работа выполнена без финансового обеспечения в рамках инициативной тематики.

Авторы выражают благодарность за помощь в проведении исследования генеральному директору ЗАО «Племзавод-Юбилейный» Сергею Николаевичу Мамонтову и зоотехнику-селекционеру Надежде Сергеевне Крючковой.

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.**Для цитирования:** Романец Е. А., Романец Т. С., Третьякова О. Л., Гетманцева Л. В. Поиск генетических маркеров для селекционно-племенной работы, направленной на повышение массы поросят при рождении. Аграрная наука Северо-Востока. 2023;24(5):839-848. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.5.839-848>

Поступила: 17.05.2023

Принята к публикации: 10.10.2023

Опубликована онлайн: 30.10.2023

Search for genetic markers for selection and breeding aimed at increasing birth weight of piglets

© 2023. Elena A. Romanets , Timofey S. Romanets, Olga L. Tretyakova, Lyubov V. Getmantseva

Don State Agrarian University, Persianovsky, Russian Federation

With the intensive increase in the fertility traits of sows, the problem of decreasing the weight of piglets at birth has arisen. In this connection, the search for genetic variants associated with the birth weight of piglets is of particular relevance and scientific significance. The aim of the work was to identify genetic variants associated with piglet weight at birth and test them to select optimal genetic markers for selection and breeding work to improve reproductive performance of pigs on the basis of full genomic genotyping data using the *Fst* method. The studies were conducted in 2020-2022 on Large White pigs ($n=239$) bred at CJSC Plemzavod-Yubileiny in the Tyumen Region. Genotyping was performed using GeneSeek® GGP Porcine HD Genomic Profiler v1 (Illumina Inc., USA). Genomic data were filtered according to the following parameters --geno 0.1, --mind 0.1, --maf 0.05, --hwe 1e-7, --indep-pairwise 50 5 0.8. To identify genomic regions associated with piglet birth weight, there was used *Fst* statistics comparing genetic variants in pigs between two groups with high and low indices. Those in which the *Fst* values exceeded the quantile level of 0.999 were considered significant variants. Student's test was used to evaluate the significance of the effects of variant genotypes on the birth weight and number of piglets at birth. The results showed that

there was a moderate negative relationship (-0.351) between piglet birth weight and number of piglets at birth. 17 SNPs associated with birth weight of piglets were identified, 9 of which were located in the *KIF13A*, *STK24*, *FDFT1*, *ADGRD1*, *STX2*, *TMEM132D*, *ENSSSCG00000054866*, *ENSSSCG00000058459* genes, as well as SNPs *rs81450496*, *rs80887103* in intergenic regions have been identified as promising genetic markers for increase in birth weight of piglets. The results obtained can be used to create domestic breeding technologies that improve the efficiency of pig breeding.

Keywords: pigs, weight per piglet at birth, SNP, Fst, genomic regions, gene

Acknowledgements: the work was carried out without financial support within the framework of the initiative theme.

The authors thank Sergei Nikolaevich Mamontov, General Director of CJSC Plemzavod-Yubileiny, and Nadezhda Sergeevna Kryuchkova, zootechnician-breeder, for their assistance in conducting the study.

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

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

For citation: Romanets E. A., Romanets T. S., Tretyakova O. L., Getmantseva L. V. Search for genetic markers for selection and breeding aimed at increasing birth weight of piglets. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2023;24(5):839-848. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.5.839-848>

Received: 17.05.2023

Accepted for publication: 10.10.2023

Published online: 30.10.2023

Воспроизводительные качества свиноматок являются сложной комбинацией биологических признаков, которые слабо наследуются. Основными показателями продуктивности свиноматок являются: плодовитость, определяемая количеством поросят при рождении и многоплодием; масса поросят, измеряемая как общая масса гнезда и масса одного поросенка при рождении. При интенсивном повышении признаков плодовитости свиноматок возникла проблема снижения массы поросят при рождении, которая является важным показателем, влияющим на экономическую эффективность свиноводства, так как низкая масса поросят снижает их жизнеспособность и приводит к более высокой смертности в период от рождения до отъёма [1, 2]. Низкая масса поросят при рождении также обусловлена задержкой их внутриутробного развития, которая может вызывать дисфункцию органов и тканей, необходимых для нормальной пищеварительной функции и метаболизма, что в дальнейшем возможно негативно повлияет на их продуктивные показатели. В связи с этим, для повышения эффективности свиноводства необходимо стремиться к увеличению массы поросят при рождении [3, 4, 5].

Условия содержания и кормления влияют на показатель «масса поросят при рождении» и другие признаки продуктивности свиней. Современное оборудование и регулирование кормовых рационов позволяют создавать оптимальные условия для роста и развития животных. Совершенствование геномных и информационных технологий может улучшить селекционную работу [6].

Анализируя информацию, представленную в российских и международных источниках, можно отметить важность исследования признаков плодовитости свиноматок

(количество поросят при рождении и многоплодие) [7, 8, 9, 10]. Тем не менее в последнее время, наряду с плодовитостью свиноматок, все более остро поднимаются вопросы о массе поросят при рождении [11, 12, 13, 14]. С одной стороны, считают, что повышение количества поросят при рождении напрямую связано со снижением массы поросят. С другой, все больше появляется данных, что снижение массы поросят при рождении не зависит напрямую от их количества, а в большей степени связано с физиологическими особенностями свиноматки (например, емкостью матки, возможностями обеспечить энергетические затраты на полноценное развитие потомства в эмбриональный период и т.д.) [15, 16, 17].

Таким образом, предполагают, что существуют отдельные генетические механизмы, регулирующие массу гнезда и не пересекающиеся с формированием признаков плодовитости.

В связи тем, что на сегодняшний день актуальной задачей является не допустить снижения массы поросят при рождении при высокой плодовитости свиноматок, необходимо проводить исследования, направленные на поиск генетических вариантов и оценку их влияния на признаки плодовитости свиней.

Цель работы – на основе данных полногеномного генотипирования, используя метод Fst, идентифицировать генетические варианты, связанные с массой поросенка при рождении, и протестировать их для выбора оптимальных генетических маркеров в селекционно-племенной работе, способствующей повышению воспроизводительной продуктивности свиней.

Научная новизна – на основе племенного поголовья свиней одного из хозяйств РФ проведены полногеномные исследования с использованием чипов GeneSeek® GGP Porcine HD Genomic Profiler v1 (Illumina Inc, США) и

установлены SNP, определяющие генетическую архитектуру массы поросят при рождении и при этом напрямую не затрагивающие плодовитость свиноматок.

Полученные результаты могут быть использованы для создания отечественных селекционных технологий, способствующих повышению эффективности свиноводства.

Материал и методы. Исследования проводили на свиньях породы крупная белая, разводимых в одном из племенных хозяйств Тюменской области. Для определения генетических вариантов оказывающих положительное влияние на массу поросят и не проявляющих влияния на их количество, учитывали показатели по 3-м опоросам: количество поросят при рождении (TNB_3) (гол.) и массу одного поросенка при рождении (LWBr_3) (кг). Обработку данных проводили в программе R studio, при фильтрации данных были удалены выбросы больше 3-х сигм. Фильтрацию данных генотипирования проводили с помощью программы Plink 1.9, для расчета Fst использовали функцию `plink_fst` (Purcell S, et al. 2007. PLINK: a toolset for whole-genome association and population-based linkage analysis. American Journal of Human Genetics, 81. <http://pngu.mgh.harvard.edu/purcell/plink/>). Для оценки нормального распределения данных использовали функцию QQ-plot. После фильтрации получили выборку из 239 свиноматок. По признаку «масса одного поросенка при рождении» их разделили на три группы: низкие, средние и высокие (по квантилям 0-0,1; 0,1-0,9; 0,9-1). На основе этого сформировали 2 группы по 24 поросенка в каждой: первая – с низкими показателями массы поросят при рождении (0,7-1,0 кг); вторая – с высокими показателями массы поросят (1,4-1,6 кг). На основе этого сформировали по 2 группы животных с высокими и низкими показателями.

Генотипирование проводили с использованием GeneSeek® GGP Porcine HD Genomic Profiler v1 (Illumina Inc, США). Массив GGP Porcine содержит около 80 тыс. SNP, специально выбранных для оптимального расстояния между хромосомами и высокими значениями частоты минорных аллелей для использования в большинстве коммерческих племенных линий. Этот массив средней плотности предлагает мощность и разрешение для широкого спектра применений в свиноводстве и геномике, включая изучение ассоциации маркер-признак, оценку чистых линий, идентификацию многолинейных эталонных популяций, а также исследовательские приложения для

полногеномного анализа. Фильтрацию геномных данных провели в соответствии со следующими параметрами --geno 0.1, --mind 0.1, --maf 0.05, --hwe 1e-7, --indep-pairwise 50 5 0.8. Для идентификации геномных областей, связанных с массой поросят при рождении, использовали статистику Fst, путем сравнения генетических вариантов у свиней I и II групп. Значимыми вариантами считали те, у которых значения Fst превышали уровень квантиля 0,999. Далее генетические варианты идентифицировали и перевели в геномные позиции Sus scrofa 11.1 по базе Ensembl genome browser 109 (<https://www.ensembl.org/index.html>). Для оценки значимости эффектов генетических вариантов на массу поросят при рождении и количество поросят при рождении использовали критерий Стьюдента. Коэффициенты корреляции определяли по критерию Пирсона, для оценки уровня достоверности использовали корреляционный тест.

Результаты и их обсуждение. Анализ корреляционных связей в свиноводстве позволяет определить степень взаимосвязи между различными параметрами продуктивности и получить информацию о том, как изменения в одном параметре могут повлиять на другой. Эта информация позволяет оптимизировать селекционно-племенную работу со стадом. Визуализация результатов анализа связи количества поросят при рождении (TNB_3) и массы поросенка при рождении (LWBr_3) представлена на кореллограмме (рис. 1).

Путем использования корреляционного анализа было установлено, что между массой поросят при рождении и количеством поросят при рождении существует умеренная отрицательная связь (-0,351). Таким образом мы предполагаем, что эти два признака не напрямую связаны между собой, что указывает на наличие генетических факторов, влияющих на массу поросенка при рождении.

Для выявления генетических факторов, влияющих на массу поросят при рождении у свиней крупной белой породы, использовали статистику Fst, с помощью которой сравнивали генетические варианты у свиней I и II групп. Значимыми вариантами считали те, у которых значения Fst превышали уровень квантиля 0,999. Результаты исследований показали наличие 17 SNPs, связанных с этим признаком. Эти варианты были локализованы на 4, 6, 7, 11-14 хромосомах, причем в 7 хромосоме было обнаружено 4 SNP, а в 14 – 8 SNP вариантов (рис. 2)

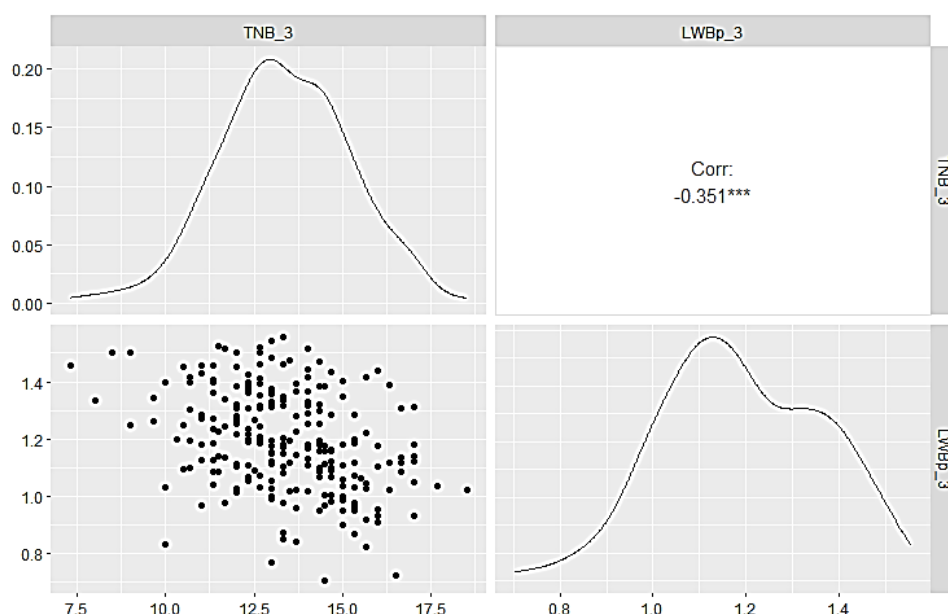


Рис. 1. Коррелограмма для признаков продуктивности свиноматок /

Fig. 1. Correlogram for sow performance traits

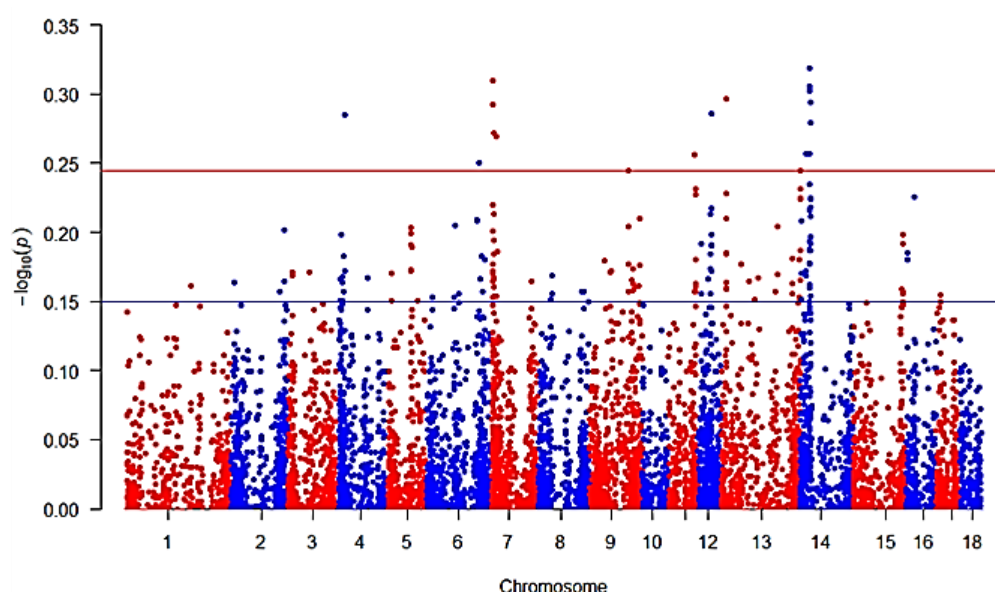


Рис. 2. Манхетенский сюжет для Fst между двумя группами свиноматок по массе поросенка при рождении /

Fig. 2. Manhattan plot for Fst between two groups of sows by piglet weight at birth

Среди выявленных SNPs были представлены различные варианты нуклеотидных замен, такие как: 1 SNP – вариант экзона некодирующего транскрипта; 1 SNP – вариант последовательности, расположенный на 3' – конце гена, 7 SNP – межгенные варианты и 6 SNP – нуклеотидные замены в интронах. Подробности приведены в таблице 1. Область генома с сильными выбросами содержала 8 генов: *KIF13A*, *STK24*, *FDFT1*, *ADGRD1*, *STX2*, *TMEM132D*, *ENSSSCG00000054866*, *ENSSSCG00000058459*.

Для определения влияния генетических вариантов с высоким Fst на фенотипы воспроизводительной продуктивности эти варианты были протестированы на всех животных (n = 239). В таблице 2 представлены результаты средних значений и стандартного отклонения фенотипов воспроизводительной продуктивности свиноматок различных генотипов по значимым генетическим вариантам.

На основе оценок эффектов были выявлены 10 SNP, показавших значительные раз-

личия по показателю «масса гнезда при рождении» у свиноматок с генотипами AA и BB. Из них 5 SNP – (rs81450496 (14_26835204), rs81261040 (14_24379011) - STX2, rs344327731 (14_24126896) - ADGRD1, rs80887103 (14_23611137), rs324422009 (11_67605281) -

STK24) были статистически значимы при $p < 0,001$. Кроме того, все значимые варианты с высоким Fst для массы гнезда при рождении (кроме rs80910377 (7_3905792)) не показали влияния на количество поросят при рождении.

Таблица 1 – Идентифицированные SNP у свиней крупной белой породы /

Table 1 – Identified SNPs in Large White Pigs

Хромосома / Chromosomes	Позиция / Position	FST	Вариант / Variant	Последовательность / Subsequence	Ген / Gene
4	16718090	0,285046	rs333630634	Intron variant	ENSSSCG00000054866
6	138522893	0,250555	rs81392150	Intergenic variant	-
7	3905792	0,292179	rs80910377	Intergenic variant	-
7	5296010	0,310044	rs343833434	Non coding transcript exon variant	ENSSSCG00000058459
7	5874224	0,272036	rs342839983	Intergenic variant	-
7	13497808	0,269663	rs324429940	Downstream gene variant	KIF13A
11	67605281	0,256122	rs324422009	Intron variant	STK24
12	34013247	0,286138	rs81434193	Intergenic variant	-
13	12208616	0,296955	rs323140387	Intergenic variant	-
14	14984025	0,256858	rs81223838	Intron variant	FDFT1
14	23611137	0,302067	rs80887103	Intergenic variant	-
14	24126896	0,30538	rs344327731	Intron variant	ADGRD1
14	24379011	0,318727	rs81261040	3 prime utr variant	STX2
14	25819210	0,304084	rs81450422	Intron variant	TMEM132D
14	25847319	0,257132	rs80818212	Intron variant	TMEM132D
14	26773435	0,279566	Не представлен в базе		
14	26835204	0,294241	rs81450496	Intergenic variant	-

Из результатов исследования можно сделать вывод, что для увеличения массы гнезда при рождении у свиней наиболее эффективными генетическими маркерами могут являться rs81450496, rs81261040 (STX2), rs344327731 (ADGRD1), rs80887103, rs324422009 (STK24). Свиноматки с генотипом rs81450496_BB имели поросят с более высокой массой при рождении на 0,12 кг ($p < 0,001$), чем свиноматки с генотипом rs81450496_AA (рис. 3А). Количество поросят при рождении у свиноматок генотипа rs81450496_BB составило 13 гол., у свиноматок с генотипом AA – 13,5 гол. (рис. 3В), однако достоверных различий по количеству поросят при рождении, связанных с генотипами rs81450496, не определено.

Вариант rs81261040 локализован в гене STX2. Свиноматки с генотипом STX2_AA имели поросят с массой при рождении значительно больше, чем свиноматки с другими

генотипами: различия между генотипами STX2_AA и STX2_BB составили 0,13 кг ($p < 0,001$), между генотипами STX2_AA и STX2_AB – 0,07 кг ($p < 0,01$) (рис. 4А). Количество поросят при рождении у свиноматок генотипа STX2_AA составило 13,6 гол. (рис. 4В).

Ген STX2 – Шига-токсин-продуцирующая кишечная палочка (STEC) вызывает дефекты проксимальных канальцев почек. Однако факторы, изменяемые токсином Шига (Stx) в проксимальных канальцах, еще не изучены, F. Obata с соавторами определили рецептор Stx Gb3 в почках мыши и человека и подтвердили экспрессию рецептора в проксимальных канальцах. Stx2 изменяет экспрессию генов в проксимальных канальцах мыши и человека посредством известных действий и недавно исследованного нарушения циркадного ритма, что может привести к дисфункции проксимальных канальцев [18].

Таблица 2 – Эффекты генотипов значимых генетических вариантов по Fst на признаки продуктивности свиноматок /

Table 2 – Effects of genotypes of significant genetic variants for Fst on the performance traits of sows

Признак / Trait	Mean±SD			AA-BB
	AA	AB	BB	
rs81450496 (14 26835204)				
LWBp 3	1,15±0,16	1,19±0,18	1,27±0,18	-0,12 ***
TNB 3	13,53±1,87	13,41±1,82	12,95±1,95	0,58 n/a
rs81450422 (14 25819210) - TMEM132D				
LWBp 3	1,27±0,16	1,23±0,18	1,14±0,16	0,13**
TNB 3	13,89±1,78	13,27±2,01	13,38±1,76	0,51 n/a
rs81261040 (14 24379011) - STX2				
LWBp 3	1,27±0,18	1,20±0,18	1,14±0,16	0,13 ***
TNB 3	13,57±1,93	13,19±1,89	13,50±1,81	0,07 n/a
rs344327731 (14 24126896) - ADGRD1				
LWBp 3	1,15±0,16	1,21±0,18	1,28±0,15	-0,13 ***
TNB 3	13,53±1,78	13,16±1,89	13,52±2,11	0,01 n/a
rs80887103 (14 23611137)				
LWBp 3	1,27±0,18	1,22±0,18	1,14±0,16	0,13***
TNB 3	13,69±1,70	13,26±1,95	13,40±1,83	0,29 n/a
rs81223838 (14 14984025) - FDFT1				
LWBp 3	1,26±0,22	1,20±0,15	1,15±0,17	0,11 **
TNB 3	13,20±1,52	13,39±1,75	13,42±2,12	-0,22 n/a
rs324422009 (11 67605281) - STK24				
LWBp 3	1,23±0,17	1,16±0,17	1,09±0,17	0,14 ***
TNB 3	13,31±1,94	13,43±1,85	13,45±1,58	0,14 n/a
rs342839983 (7 5874224)				
LWBp 3	1,15±0,17	1,20±0,18	1,26±0,18	-0,11 **
TNB 3	13,40±1,89	13,32±1,84	13,44±1,95	-0,04 n/a
rs343833434 (7 5296010) - ENSSCG00000058459				
LWBp 3	1,16±0,17	1,22±0,17	1,28±0,17	-0,12 **
TNB 3	13,32±1,94	13,50±1,71	13,25±1,97	0,07 n/a
rs81392150 (6 138522893)				
LWBp 3	1,14±0,19	1,21±0,17	1,22±0,16	-0,08 *
TNB 3	13,52±2,00	13,39±1,80	12,99±1,78	0,53 n/a
rs333630634 (4 16718090) - ENSSCG00000054866				
LWBp 3	1,17±0,17	1,21±0,18	1,23±0,15	-0,06 n/a
TNB 3	13,54±1,81	13,28±1,93	12,70±1,84	-0,84 n/a
rs80910377 (7 3905792)				
LWBp 3	1,30±0,19	1,22±0,17	1,17±0,17	0,13 n/a
TNB 3	11,85±1,92	13,27±1,85	13,51±1,84	1,66 *
rs324429940 (7 13497808) - KIF13A				
LWBp 3	1,16±0,17	1,19±0,18	1,22±0,17	-0,06 n/a
TNB 3	13,72±1,78	13,39±1,74	13,10±2,03	0,62 n/a
rs81434193 (12 34013247)				
LWBp 3	1,21±0,18	1,20±0,17	1,16±0,18	0,05 n/a
TNB 3	13,27±2,18	13,15±1,89	13,72±1,63	0,45 n/a
rs323140387 (13 12208616)				
LWBp 3	1,26±0,17	1,25±0,17	1,16±0,17	0,10 n/a
TNB 3	14,00±2,02	12,95±1,89	13,49±1,83	0,51 n/a
rs80818212 (14 25847319) - TMEM132D				
LWBp 3	1,23±0,16	1,25±0,17	1,15±0,17	0,08 n/a
TNB 3	13,53±1,22	13,29±2,11	13,40±1,77	0,13 n/a

Примечания: Mean – среднее значение; SD – стандартное отклонение; LWBp_3 – масса поросенка при рождении (кг); TNB_3 – кол-во поросят при рождении (гол.); *** – p < 0,001, *Mean * – p < 0,01, * – p < 0,05, n/a – p > 0,05 /

Notes: Mean – mean value; SD – standard deviation; LWBp_3 – piglet weight at birth (kg); TNB_3 – number of piglets at birth (head); *** – p < 0.001, ** – p < 0.01, * – p < 0.05, n/a – p > 0.05

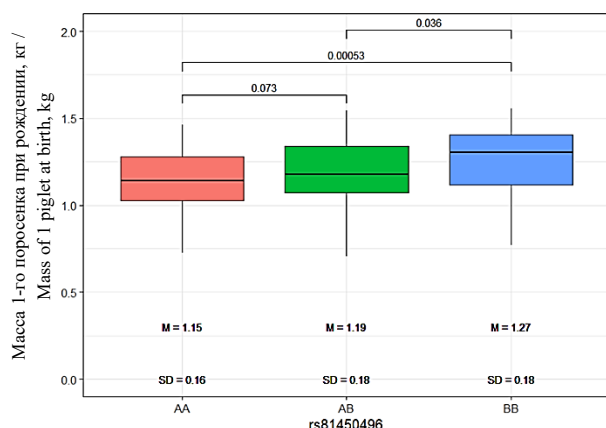


Рис. 3А. Масса поросят при рождении при различных генотипах rs81450496 /

Fig. 3A. Weight of piglets at birth in different rs81450496 genotypes

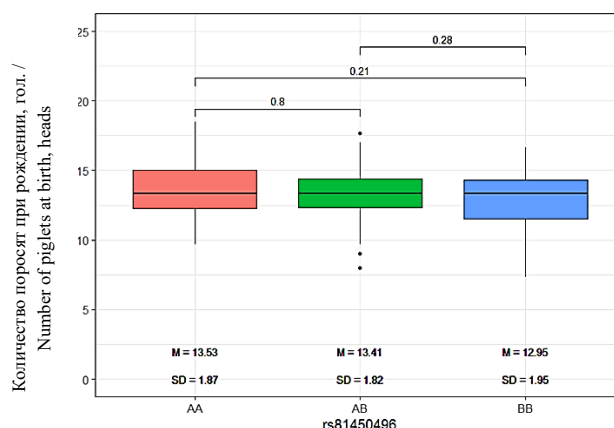


Рис. 3В. Количество поросят при различных генотипах rs81450496 /

Fig. 3B. Number of piglets in different rs81450496 genotypes

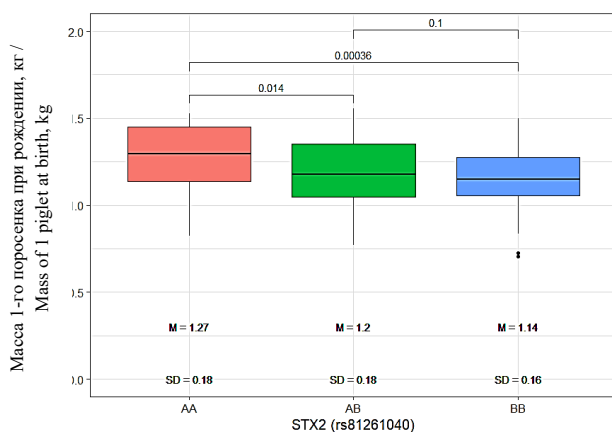


Рис. 4А. Масса поросят при рождении при различных генотипах гена STX2 /

Fig. 4A. Birth weight of piglets with different STX2 genotypes

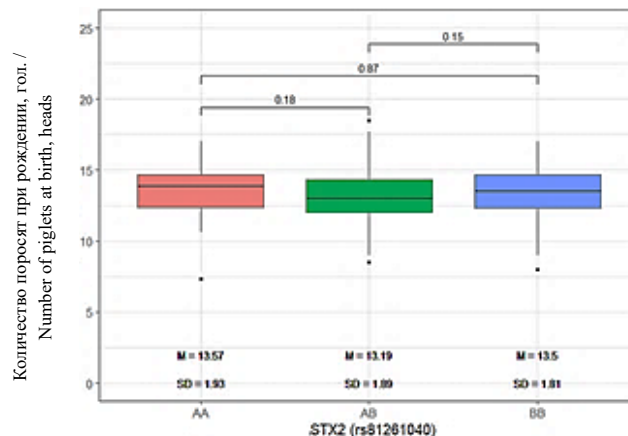


Рис. 4В. Количество поросят при различных генотипах гена STX2 /

Fig. 4B. Number of piglets with different STX2 genotypes

Также было выявлено, что вариант rs344327731, расположенный в гене *ADGRD1*, оказывает влияние на массу поросят при рождении. Свиноматки с генотипом *ADGRD1_BB* имели поросят с массой на 0,13 кг ($p < 0,001$) больше, чем свиноматки с генотипом *ADGRD1_AA*. Достоверные различия также определены между генотипами *ADGRD1_AB* и *ADGRD1_AA* (0,06 кг, ($p < 0,05$)) (рис. 5А). Количество поросят при рождении у свиноматок генотипа *ADGRD1_BB* составило 13,5 голов (рис. 5В).

Литературный анализ показал, что, ген *ADGRD1*, также известный как *GPR133*, кодирует белок, который является членом семейства G-протеин-связанных рецепторов, кото-

рые играют важную роль в передаче сигналов внутри клеток и участвуют во множестве биологических процессов.

Существует ограниченное количество исследований, связанных с геном *ADGRD1*. В своей работе Mansego M. L. с соавторами [19] ген *ADGRD1* ассоциировали с массой тела у людей, что согласуется с результатами более раннего исследования Chan, Y. F. с соавторами [20], связавшего SNPs в этом гене с массой тела у мышей. Также ученый E. Bianchi с соавторами в своих исследованиях, опубликованных в 2021 году, сообщают, что ген *ADGRD1* играет важную роль в транспортировке эмбрионов, так как он регулирует поток овидуктальной жидкости, контролируя транзит эмбриона [21].

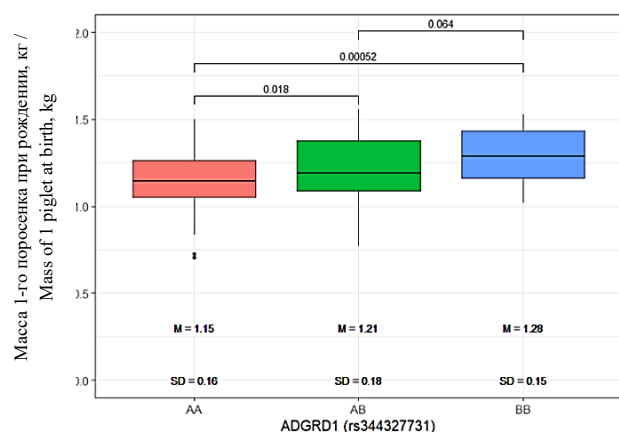


Рис. 5А. Масса поросят при рождении при различных генотипах гена ADGRD1 /
Fig. 5A. Birth weight of piglets with different ADGRD1 genotypes

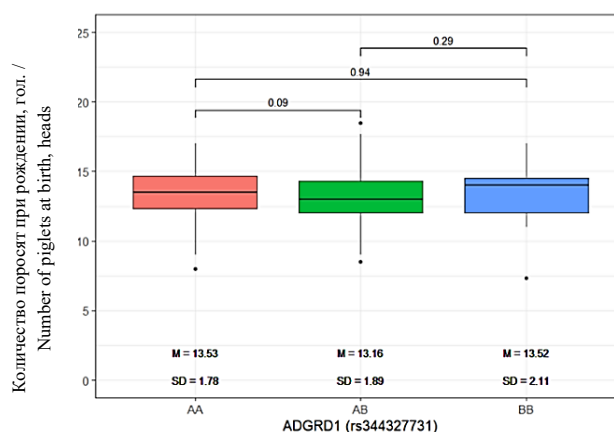


Рис. 5В. Количество поросят при различных генотипах гена ADGRD1 /
Fig. 5B. Number of piglets with different ADGRD1 genotypes

Эффект генотипа rs80887103_AA на массу поросят выявили в варианте rs80887103, при этом эффект аллеля А также проявился и в генотипе rs80887103_AB. Различия по массе поросят между генотипами rs80887103_AA и rs80887103_BB составили 0,13 кг ($p < 0,001$),

а между rs80887103_AB и rs80887103_BB – 0,08 кг ($p < 0,001$) (рис. 6А). У свиноматок количество поросят при рождении с генотипами rs80887103_AA и rs80887103_AB получено 13,7 и 13,3 соответственно (рис. 6В).

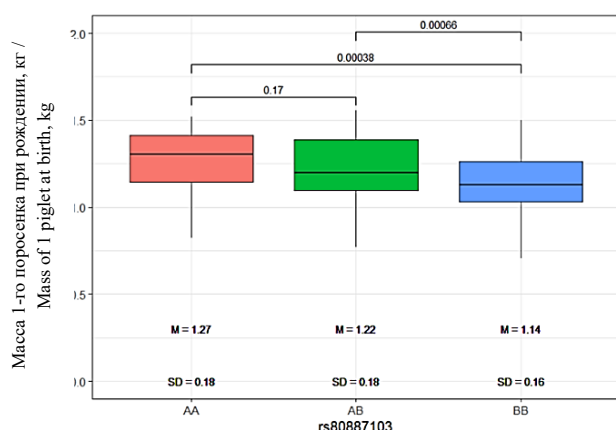


Рис. 6А. Масса поросят при рождении при различных генотипах rs80887103 /
Fig. 6A. Weight of piglets at birth in different rs80887103 genotypes

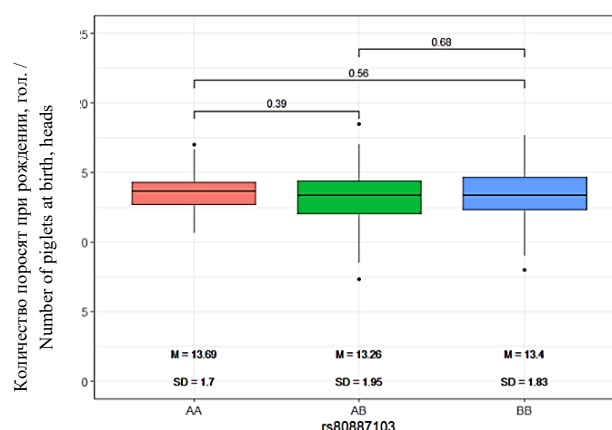


Рис. 6В. Количество поросят при различных генотипах rs80887103 /
Fig. 6B. Number of piglets in different rs80887103 genotypes

Установлен вариант rs324422009 в гене STK24. Свиноматки генотипа STK24_AA достоверно превосходили животных с другими генотипами по массе поросят при рождении. Свиноматки генотипа STK24_AA имели поросят с массой на 0,23 кг ($p < 0,001$) больше, чем свиноматки с генотипом STK24_BB, и на 0,07 кг ($p < 0,01$) больше, чем свиноматки с генотипом STK24_AB (рис. 7А). Количество поросят при рождении у свиноматок генотипа STK24_AA составило 13,3 гол. (рис. 7В).

Ген STK24 – серин/треонин-протеинкиназа 24 принадлежит к подсемейству киназ III зародышевого центра (GCK-III) и экспрессируется в нормальных тканях и тканях рака желудка [22]. Этот ген также известен, как STE20-подобная протеинкиназа млекопитающих 3 (MST-3). В исследованиях Hsu H.P. с соавторами роль STK24 была заключена в контроле миграции раковых клеток и регуляции дегрануляции нейтрофилов [23].

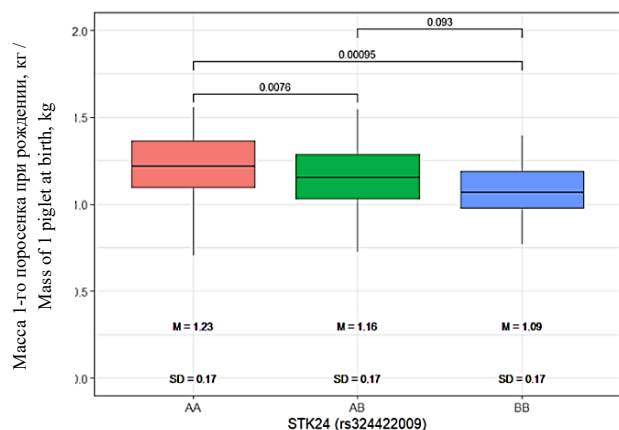


Рис. 7А. Масса поросят при рождении при различных генотипах гена STK24 /
Fig. 7A. Birth weight of piglets with different STK24 genotypes

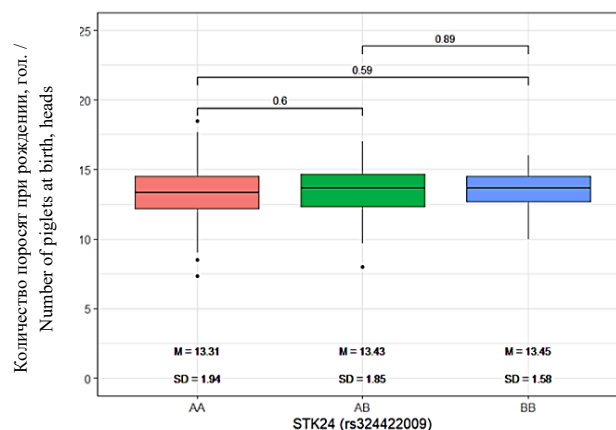


Рис. 7Б. Количество поросят при различных генотипах гена STK24 /
Fig. 7B. Number of piglets with different genotypes of the STK24 gene

Заключение. Использование метода Fst позволило выявить 17 SNP, связанных с массой поросят при рождении, 9 из которых локализованы в генах *KIF13A*, *STK24*, *FDFT1*, *ADGRD1*, *STX2*, *TMEM132D*, *ENSSSCG00000054866*, *ENSSSCG00000058459*.

SNPs в генах *STK24*, *ADGRD1*, *STX2*, и SNPs rs81450496, rs80887103, локализованные

в межгенной области, были определены как перспективные генетические маркеры, которые следует рассматривать для дальнейшего изучения и впоследствии использовать в селекционно-племенной работе для повышения массы поросят при рождении.

References

1. Declerck I., Dewulf J., Sarrazin S., Maes D. Long-term effects of colostrum intake in piglet mortality and performance. *Journal of Animal Science*. 2016;94(4):1633-1643. DOI: <https://doi.org/10.2527/jas.2015-9564>
2. Rutherford K., Baxter E., D'earth R., Turner S., Arnott G., Roehe R., Ask B., Sandøe P., Moustsen V. A., Thorup F., Edwards S. A., Berg P., Lawrence A. B. The welfare implications of large litter size in the domestic pig I: biological factors. *Animal Welfare*. 2013;22(2):199-218. DOI: <https://doi.org/10.7120/09627286.22.2.199>
3. Tan C., Huang Z., Xiong W., Ye H., Deng J., Yin Y. A review of the amino acid metabolism in placental function response to fetal loss and low birth weight in pigs. *Journal of Animal Science and Biotechnology*. 2022;13(1):28. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40104-022-00676-5>
4. Ayuso M., Irwin R., Walsh C., Van Cruchten S., Van Ginneken C. Low birth weight female piglets show altered intestinal development, gene expression, and epigenetic changes at key developmental loci. *The FASEB Journal*. 2021;35(4):e21522. DOI: <https://doi.org/10.1096/fj.202002587R>
5. Liu Z. X., Wei H. K., Zhou Y. F., Peng J. Multi-level mixed models for evaluating factors affecting the mortality and weaning weight of piglets in large-scale commercial farms in central China. *Animal Science Journal*. 2018;89(5):760-769. DOI: <https://doi.org/10.1111/asj.12963>
6. Суховольский О. К. Значение биотехнологии в современном животноводстве. *Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета*. 2019;(54):102-107. DOI: <https://doi.org/10.24411/2078-1318-2019-11102> EDN: OBWFEN
7. Sukhovolskiy O. K. The importance of biotechnology in modern animal husbandry. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Izvestiya Saint-Petersburg State Agrarian University*. 2019;(54):102-107. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24411/2078-1318-2019-11102>
8. Wang X., Liu X., Deng D., Yu M., Li X. Genetic determinants of pig birth weight variability. *BMC Genetic*. 2016;17(1):41-48. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12863-015-0309-6>
9. Ajayi B., Akinokun J. Evaluation of some litter traits and heritability estimates of Nigerian Indigenous pigs. *International Journal of Applied Agriculture and Apiculture Research*. 2013;9(1-2):113-119. URL: <https://www.ajol.info/index.php/ijaaar/article/view/96936>
10. Putz A., Tiezzi F., Maltecca C., Gray K. A., Knauer M. Variance component estimates for alternative litter size traits in swine. *Journal of Animal Science*. 2015;93(11):5153-5163. DOI: <https://doi.org/10.2527/jas.2015-9416>
11. Banville M., Riquet J., Bahun D., Sourdoux M., Canario L. Genetic parameters for litter size, piglet growth and sow's early growth and body composition in the Chinese-European line Tai Zumu. *Journal of Animal Breeding and Genetics*. 2015;132(4):328-337. DOI: <https://doi.org/10.1111/jbg.12122>
12. Bekenev V. A. Ways to improve the gene pool of pigs of the Russian Federation. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2018;22(8):912-921. DOI: <https://doi.org/10.18699/VJ18.433>

12. Bakoev S., Traspov A., Getmantseva L., Belous A., Karpushkina T., Kostyunina O., Usatov A., Tatarinova T. V. Detection of genomic regions associated malformations in newborn piglets: a machine-learning approach. *PeerJ*. 2021;9:e11580. DOI: <https://doi.org/10.7717/peerj.11580>
13. Bakoev S., Getmantseva L., Kostyunina O., Bakoev N., Prytkov Y., Usatov A., Tatarinova T. V. Genome-wide analysis of genetic diversity and artificial selection in Large White pigs in Russia. *PeerJ*. 2021;9:e11595. DOI: <https://doi.org/10.7717/peerj.11595>
14. Bakoev S., Getmantseva L., Bakoev F., Kolosova M., Gabova V., Kolosov A., Kostyunina O. Survey of SNPs Associated with Total Number Born and Total Number Born Alive in Pig. *Genes*. 2020;11(5):491. DOI: <https://doi.org/10.3390/genes11050491>
15. Sell-Kubiak E. Selection for litter size and litter birthweight in Large White pigs: Maximum, mean and variability of reproduction traits. *Animal*. 2021;15(10):100352. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.animal.2021.100352>
16. Distl O. Mechanisms of regulation of litter size in pigs on the genome level. *Reproduction in Domestic Animals*. 2007;42(S2):10-16. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1439-0531.2007.00887.x>
17. Zhang L., Wang L., Li Y., Li W., Yan H., Liu X., Zhao K., Wang L. A. substitution within erythropoietin receptor gene D1 domain associated with litter size in Beijing Black pig, *Sus scrofa*. *Animal science journal*. 2011;82(5):627-632. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1740-0929.2011.00901.x>
18. Obata F., Ozuru R., Tsuji T., Matsuba T., Fujii J. Stx2 Induces Differential Gene Expression and Disturbs Circadian Rhythm Genes in the Proximal Tubule. *Toxins*. 2022;14(2):69. DOI: <https://doi.org/10.3390/toxins14020069>
19. Manso M. L., Milagro F. I., Zulet M. Á., Moreno-Aliaga M. J., Martínez J. A. Differential DNA methylation in relation to age and health risks of obesity. *International journal of molecular sciences*. 2015;16(8):16816-16832. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms160816816>
20. Chan Y. F., Jones F. C., McConnell E., Bryk J., Bünger L., Tautz D. Parallel selection mapping using artificially selected mice reveals body weight control loci. *Current Biology*. 2012;22(9):794-800. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cub.2012.03.011>
21. Bianchi E., Sun Y., Almansa-Ordóñez A., Woods M., Goulding D., Martínez-Martin N., Wright G. J. Control of oviductal fluid flow by the G-protein coupled receptor *Adgrd1* is essential for murine embryo transit. *Nature communications*. 2021;12(1):1251. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21512-w>
22. Ling P., Lu T. J., Yuan C. J., Lai M. D. Biosignaling of mammalian Ste20-related kinases. *Cellular signalling*. 2008;20(7):1237-1247. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cellsig.2007.12.019>
23. Hsu H. P., Wang C. Y., Hsieh P. Y., Fang J. H., Chen Y. L. Knockdown of serine/threonine-protein kinase 24 promotes tumorigenesis and myeloid-derived suppressor cell expansion in an orthotopic immunocompetent gastric cancer animal model. *Journal of Cancer*. 2020;11(1):213-228. DOI: <https://doi.org/10.7150/jca.35821>

Сведения об авторах

✉ **Романец Елена Андреевна**, аспирант, ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет», ул. Кривошлыкова, 24, п. Персиановский, Российская Федерация, 346493, e-mail: dongau@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2824-9564>, e-mail: lena9258@mail.ru

Романец Тимофей Сергеевич, кандидат с.-х. наук, старший преподаватель кафедры разведения сельскохозяйственных животных, частной зоотехнии и зоогигиены имени академика П. Е. Ладана, ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет», ул. Кривошлыкова, 24, п. Персиановский, Российская Федерация, 346493, e-mail: dongau@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0690-4217>

Третьякова Ольга Леонидовна, доктор с.-х. наук, профессор кафедры разведения сельскохозяйственных животных, частной зоотехнии и зоогигиены имени академика П. Е. Ладана, ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет», ул. Кривошлыкова, 24, п. Персиановский, Российская Федерация, 346493, e-mail: dongau@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0295-89-39>

Гетманцева Любовь Владимировна, доктор биол. наук, ведущий научный сотрудник, ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет», ул. Кривошлыкова, 24, п. Персиановский, Российская Федерация, 346493, e-mail: dongau@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1868-3148>

Information about the authors

✉ **Elena A. Romanets**, graduate student, Don State Agrarian University, 24 Krivoshlykova St., Persianovskiy settlement, Russian Federation, 346493, e-mail: dongau@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2824-9564>, e-mail: lena9258@mail.ru

Timofey S. Romanets, PhD in Agricultural Science, senior lecturer, the Department of Farm Animal Breeding, Private Zootechnics and Zoogygiene named after academician P.E. Ladan, Don State Agrarian University, 24 Krivoshlykova St., Persianovskiy settlement, Russian Federation, 346493, e-mail: dongau@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0690-4217>

Olga L. Tretyakova, DSc in Agricultural Science, professor at the Department of Farm Animal Breeding, Private Zootechnics and Zoogygiene named after academician P.E. Ladan, Don State Agrarian University, 24 Krivoshlykova St., Persianovskiy settlement, Russian Federation, 346493, e-mail: dongau@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0295-89-39>

Lyubov V. Getmantseva, DSc in Biological Science, leading researcher, Don State Agrarian University, 24 Krivoshlykova St., Persianovskiy settlement, Russian Federation, 346493, e-mail: dongau@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1868-3148>

✉ – Для контактов / Corresponding author



Локусы панели генотипирования секвенированием по технологии AgriSeq в породе маньчский меринос

© 2023. А. Ю. Криворучко^{1, 2✉}, А. А. Лиховид², А. А. Каниболоцкая¹, Т. Ю. Саприкина¹, М. Ю. Кухарук², О. А. Яцык¹

¹ФГБНУ «Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр», г. Михайловск, Ставропольский край, Российская Федерация

²ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», г. Ставрополь, Российская Федерация

С использованием генотипирования баранов породы маньчский меринос на базе Illumina BeadChip Ovine 600K были обнаружены локусы, пригодные для генотипирования секвенированием животных этой породы. Выявлены однонуклеотидные полиморфизмы (SNP) с высокой частотой встречаемости в диапазоне 0,2850-0,3149 гомозигот как диких, так и мутантных вариантов. Гетерозиготные варианты этих замен встречались с частотой $0,379 \pm 0,012$. Количество соответствующих выбранным критериям полиморфизмов составило 521. Анализ расположения обнаруженных SNP в геноме овец показал их наличие по всей длине генотипируемой области ДНК. Наибольшее количество полиморфизмов находилось на 1, 2, 3, 17 и X хромосомах. Меньше всего полиморфизмов выявлено на 18, 21, 24 и 25 хромосомах. Полученный набор замен позволит эффективно решать задачи подтверждения достоверности происхождения овец породы маньчский меринос, точно идентифицировать животных в процессе селекционной работы, проводить учет инбридинга в популяции. Предложенный нами набор SNP рекомендуется как для использования в генотипировании секвенированием нового поколения, так и для кастомизации SNP-биочипов.

Ключевые слова: овца, SNP, AgriSeq, NGS, селекция, генотип

Благодарности: работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, соглашение № 22-26-20009 от 03.21.2022.

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Криворучко А. Ю., Лиховид А. А., Каниболоцкая А. А., Саприкина Т. Ю., Кухарук М. Ю., Яцык О. А. Локусы панели генотипирования секвенированием по технологии AgriSeq в породе маньчский меринос. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2023;24(5):849-857. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.5.849-857>

Поступила: 05.04.2023

Принята к публикации: 04.09.2023

Опубликована онлайн: 30.10.2023

Loci of the genotyping panel by sequencing using AgriSeq technology in the Manych Merino breed

© 2023. Alexander Yu. Krivoruchko^{1, 2✉}, Andrey A. Likhovid², Anastasia A. Kanibolotskaya¹, Tatyana Yu. Saprikina¹, Maxim Yu. Kuharuk², Olesya A. Yatsyk¹

¹North Caucasus Federal Agrarian Research Centre, Mikhailovsk, Stavropol Territory, Russian Federation

²North Caucasus Federal University, Stavropol, Russian Federation

Using the genotyping of sheep of the Manych Merino breed on the basis of Illumina BeadChip Ovine 600K, loci suitable for genotyping by sequencing animals of this breed were found. Single nucleotide polymorphisms with a high frequency of occurrence in the range of 0.2850-0.3149 homozygotes of both wild and mutant variants were identified. Heterozygous variants of these substitutions occurred with a frequency of 0.379 ± 0.012 . The number of polymorphisms corresponding to the selected criteria was 521. Analysis of the location of the detected SNPs in the sheep genome showed their presence along the entire length of the genotyped DNA region. The largest number of polymorphisms were found on chromosomes 1, 2, 3, 17 and X. The least polymorphisms were detected on chromosomes 18, 21, 24 and 25. The resulting set of substitutions will effectively solve the problems of confirming the authenticity of the origin of sheep of the Manych Merino breed, accurately identify animals in the process of breeding work, and account for inbreeding in the population. The proposed set of SNPs is recommended both for use in genotyping by sequencing of a new generation, and for customization of SNP biochips.

Keywords: sheep, SNP, AgriSeq, NGS, breeding, genotype

Acknowledgements: the work was carried out under the support of the Russian Science Foundation, Agreement No. 22-26-20009 dated 03.21.2022.

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: Krivoruchko A. Yu., Likhovid A. A., Kanibolotskaya A. A., Saprikina T. Yu., Kuharuk M. Yu., Yatsyk O. A. Loci of the genotyping panel by sequencing using AgriSeq technology in the Manych Merino breed. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2023;24(5):849-857. (In Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.5.849-857>

Received: 05.04.2023

Accepted for publication: 04.09.2023

Published online: 30.10.2023

Генотипирование секвенированием с использованием технологии секвенирования нового поколения представляет собой важный инструмент селекционной работы в животноводстве. С его помощью можно решать широкий круг задач, связанных как с изучением генетической структуры популяций, так и с выявлением отдельных локусов, влияющих на развитие у животных фенотипических признаков. Последние могут определять породную принадлежность, параметры продуктивности или быть связанными с наследственной патологией [1]. Применение технологий геномной оценки привело к существенным успехам в повышении продуктивности у овец, крупного рогатого скота, свиней [2, 3, 4, 5].

Одним из наиболее распространенных направлений использования достижений молекулярной генетики в животноводстве является оценка родственных связей между животными. Чаще всего, это определение достоверности происхождения по генетическим параметрам матери, отца и потомка. Это также является подтверждением племенных качеств животных, так как доказывает происхождение от племенных родителей. Для решения этой задачи наиболее часто используют метод фрагментного анализа для оценки аллельного спектра микросателлитных маркеров. Метод является удобным, быстрым и точным [6]. При этом у него имеются и некоторые недостатки, связанные с ограниченным числом аллелей, определяемых за один запуск генетического анализатора. Также микросателлитные маркеры не связаны с какими-либо хозяйственно ценными признаками и, по сути, достаточно косвенно характеризуют геном.

Более современным методом определения достоверности происхождения является выявление однонуклеотидных полиморфизмов (SNP), которые могут быть как неспецифическими маркерами, так и мутациями, влияющими на продуктивные качества животных. Для одновременного выявления небольшого количества SNP можно использовать то же оборудование, что и для фрагментного анализа – генетический секвенатор на основе капиллярного электрофореза [6]. Но, когда необходимо оценить сотни и тысячи SNP этот метод

становится малоприменимым. Более перспективно выполнять анализ такого количества полиморфизмов методом таргетного секвенирования на основе технологии нового поколения (NGS) [7, 8]. Она дает возможность определения большого числа полиморфизмов сразу для нескольких сотен образцов, что ограничивается только емкостью используемого чипа [9, 10]. Соответственно, с количеством одновременно исследуемых образцов прогрессивно снижается себестоимость исследования, что очень важно при массовом генотипировании [11]. На основе этой технологии были успешно генотипированы различные породы свиней, коров и овец [5, 12, 13].

Использование генотипирования нового поколения существенно облегчилось с появлением удобных инструментов для формирования наборов подготовки библиотек ДНК, таких как сервис AgriSeq. Они позволяют достаточно просто создать запрос на изготовление набора праймеров мультиплексной ПЦР и, при необходимости, менять спектр выявляемых полиморфизмов [11]. Однако для подготовки списка локусов таргетного секвенирования необходимо провести ряд предварительных исследований. Они включают в себя полногеномный поиск полиморфизмов, имеющих достаточную частоту встречаемости в исследуемой породе, чтобы исключить из таргетного секвенирования редко встречающиеся замены. Выполнить такой поиск можно с помощью полногеномного секвенирования, но более экономичным является подход с использованием ДНК-биочипов высокой плотности, оценивающих геном по сотням тысяч локусов [14].

Цель исследований – применить генотипирование на ДНК-биочипах компании Illumina, выдающих информацию о 600 000 локусах, для подготовки списка полиморфизмов у овец породы маньчжурский меринос с целью дальнейшего использования генотипирования секвенированием в селекции этой породы.

Научная новизна – проведено исследование овец породы маньчжурский меринос с использованием Illumina BeadChip Ovine 600K. На основании полученных результатов впервые предложен набор локусов для генотипирования секвенированием нового поколения с использованием технологии AgriSeq.

Материал и методы. Оценка фенотипа. Объектом исследования служили баранчики породы маньчжский меринос в возрасте 12 месяцев из племенных хозяйств Ставропольского края (Российская Федерация). Всего для генотипирования было отобрано 50 особей с наиболее выраженными породными признаками, к которым относятся длина, плотность и тонина шерсти, качество жиропота, параметры экстерьера, живая масса. Параметры шерсти оценивали согласно рекомендациям Холман и Малау-Адули (Holman and Malau-Aduli) [15], экстерьер – по промерам с помощью измерительной ленты и тазомера. Взвешивание выполняли с использованием весов с точностью до 10 г. Живой вес составлял $72,1 \pm 0,8$ кг, высота в холке – $73,1 \pm 0,7$ см. Все животные были клинически здоровы, содержались в оптимальных условиях и получали сбалансированный рацион питания.

Генотипирование. 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. Генотипирование животных проводили с использованием Ovine Infinium HD BeadChip 600K (Illumina Inc. CA, США) в соответствии с протоколом производителя. Первичную обработку результатов генотипирования проводили с помощью программы Genome Studio 2.0 (Illumina Inc. CA, США).

Контроль качества генотипирования. Контроль качества генотипирования проводили с использованием программного обеспечения PLINK V.1.07 [16]. В обработку данных были включены образцы с показателем количества выявленных однонуклеотидных полиморфизмов больше 0,95 (Call Rate). Из анализа исключили однонуклеотидные полиморфизмы, не имеющие хромосомной или физической локализации, 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) использовалось значение $p = 0,0001$. С положительным результатом контроль качества генотипирования прошли 50 образцов.

Генетический и статистический анализ. Анализ результатов генотипирования, исследование частоты встречаемости полиморфизмов, оценку распределения SNP по регионам генома проводили с использованием программного обеспечения Genome Studio 2.0 software

(Illumina Inc. CA, USA). Описательную статистику для дистанций между SNP рассчитывали в Excel для Windows (Microsoft, USA). Для картирования SNP использовали сборку генома Ovis_Aries_3.1.

Результаты и их обсуждение. У баранов породы маньчжский меринос мы изучили результаты генотипирования с использованием Ovine Infinium HD BeadChip 600K для выбора не менее 400 однонуклеотидных полиморфизмов, пригодных по своим параметрам для генотипирования секвенированием. В качестве основного параметра, определяющего возможность использования SNP в составе панели для генотипирования, мы использовали частоту встречаемости в исследованной выборке животных. Так как в результате исследования на ДНК-биочипах мы получили информацию более, чем о 606 000 полиморфизмах, для целей генотипирования выбирались те, которые имели наибольшую частоту встречаемости в выборке как для «диких», так и мутантных гомозиготных вариантов. В качестве среднего опорного значения частоты встречаемости было выбрано 0,3, вокруг которого определялся интервал частот встречаемости, в который попадали выбираемые полиморфизмы. Для более точного выбора окончательного списка замен мы тестировали несколько интервалов различного диапазона частот встречаемости, чтобы в итоге количество полиморфизмов составляло от 400 до 600.

Результаты анализа количества SNP, соответствующих разным диапазонам выбранной частоты встречаемости представлены в таблице 1. Мы начинали тестирование с больших диапазонов, постепенно сужая выбираемый интервал. Как показали результаты, диапазоны больше 0,2800-0,3299 включали слишком большое количество замен. Для наших исследований это было избыточно, так как список в этом случае включал более 10 тысяч соответствующих поставленным критериям полиморфизмов. При выборе слишком узких диапазонов, менее 0,2900-0,3139, подходящих для наших условий, оказывалось слишком малое количество замен. Оптимальным результатом в 522 замены выбрали интервал 0,2850-0,3149. Несмотря на то, что это количество большее, чем требуемое для составления панели (мы рассчитывали на 400 полиморфизмов), оно позволило в дальнейшем уточнять список за счет исключения тех замен, которые либо были расположены слишком близко друг

к другу, либо имели технические трудности в подборе праймеров или при проведении амплификации. В выбранной нами группе средняя частота встречаемости гетерозиготных вариантов замен составляла около 0,379. При анализе расположения выбранных полиморфизмов на хромосомах оказалось, что один

из них не имеет физической локализации, или находится на хромосоме 0 по классификации Illumina. Эта замена, s60578.1, была исключена из перечня для подготовки панели секвенирования и итоговое количество полиморфизмов на этом этапе исследования составило 521 единицу.

Таблица 1 – Количество SNP в различных диапазонах частоты встречаемости у баранов породы маньчжский меринос /

Table 1 – The number of SNPs in different frequency ranges in rams of the Manch Merino breed

№ выборки / Sample No.	Частота встречаемости ДГ (min-max) / Frequency of occurrence of WG (min-max)	Количество ДГ SNP (n) / Number of WG SNP (n)	Частота встречаемости МГ (min-max) / Frequency of occurrence of MG (min-max)	Количество ДГ+МГ SNP (n) / Amount of WG+MG SNP (n)	Частота встречаемости гетерозигот (M±m) / Frequency of occurrence of heterozygotes (M±m)
1	0,2950-0,3049	606	0,2950-0,3049	66	0,381±0,011
2	0,2950-0,3099	11042	0,2950-0,3099	129	0,378±0,032
3	0,2930-0,3129	12649	0,2930-0,3129	225	0,384±0,010
4	0,2900-0,3139	15903	0,2900-0,3139	316	0,431±0,014
5	0,2850-0,3149	22431	0,2850-0,3149	522	0,379±0,012
6	0,2800-0,3299	41916	0,2800-0,3299	1132	0,382±0,011
7	0,2500-0,3549	87884	0,2500-0,3549	11083	0,384±0,009

Примечания: ДГ – «дикий» гомозиготный генотип; МГ – мутантный гомозиготный генотип /
Notes: WG is a "wild" homozygous genotype; MG is a mutant homozygous genotype

Выбранные 515 однонуклеотидных замен были оценены по распределению на основе частоты встречаемости у исследуемой группы баранов породы маньчжский меринос. Было выявлено, что для «диких» гомозигот значительное количество полиморфизмов имело частоты встречаемости у нижней границы диапазона 0,285 (рис. 1, А). Однако в целом «дикие» гомозиготы относительно равномерно располагались во всех частях выбранного интервала, не имея больше пиков в других частях. Оценка частоты встречаемости «диких» гомозиготных вариантов с разбиением на хромосомы показала, что средние значения частоты встречаемости достаточно сильно варьировали между хромосомами (рис. 1, В). Изменения составляли от 0,292 на хромосоме 2 до 0,305 для хромосом 7, 9 и 10. Минимальные показатели частоты встречаемости для большинства хромосом находились вблизи нижней границы интервала 0,285, однако для хромосомы 23 это значение составило 0,292. Максимальные показатели частоты встречаемости также были близкими среди хромосом, исключение составили

хромосомы 18 и 19, где этот параметр не превышал 0,3.

Среди гетерозиготных типов выбранных замен наибольшее количество имело частоту встречаемости в середине общего диапазона 0,3505-0,4199 (рис. 1, С). По мере приближения к границам интервала выбранных частот встречаемости, количество полиморфизмов прогрессивно снижалось, причем в меньшую сторону интенсивность снижения была существенно выше. Средние значения частоты встречаемости полиморфизмов в виде гетерозиготных вариантов, в зависимости от локализации на хромосомах, имели выраженные отличия от «диких» гомозигот (рис. 1, D). Так, средняя частота полиморфизмов на хромосомах изменялась более интенсивно. Она колебалась от 0,405 на четырех хромосомах до 0,416 на хромосомах 22 и 25. Минимальные показатели имели существенных разброс – от 0,375 до 0,405 на хромосоме 24. Максимальные значения частоты встречаемости были почти одинаковыми у всех хромосом, за исключением хромосомы 9, у которой она снизилась до 0,408.

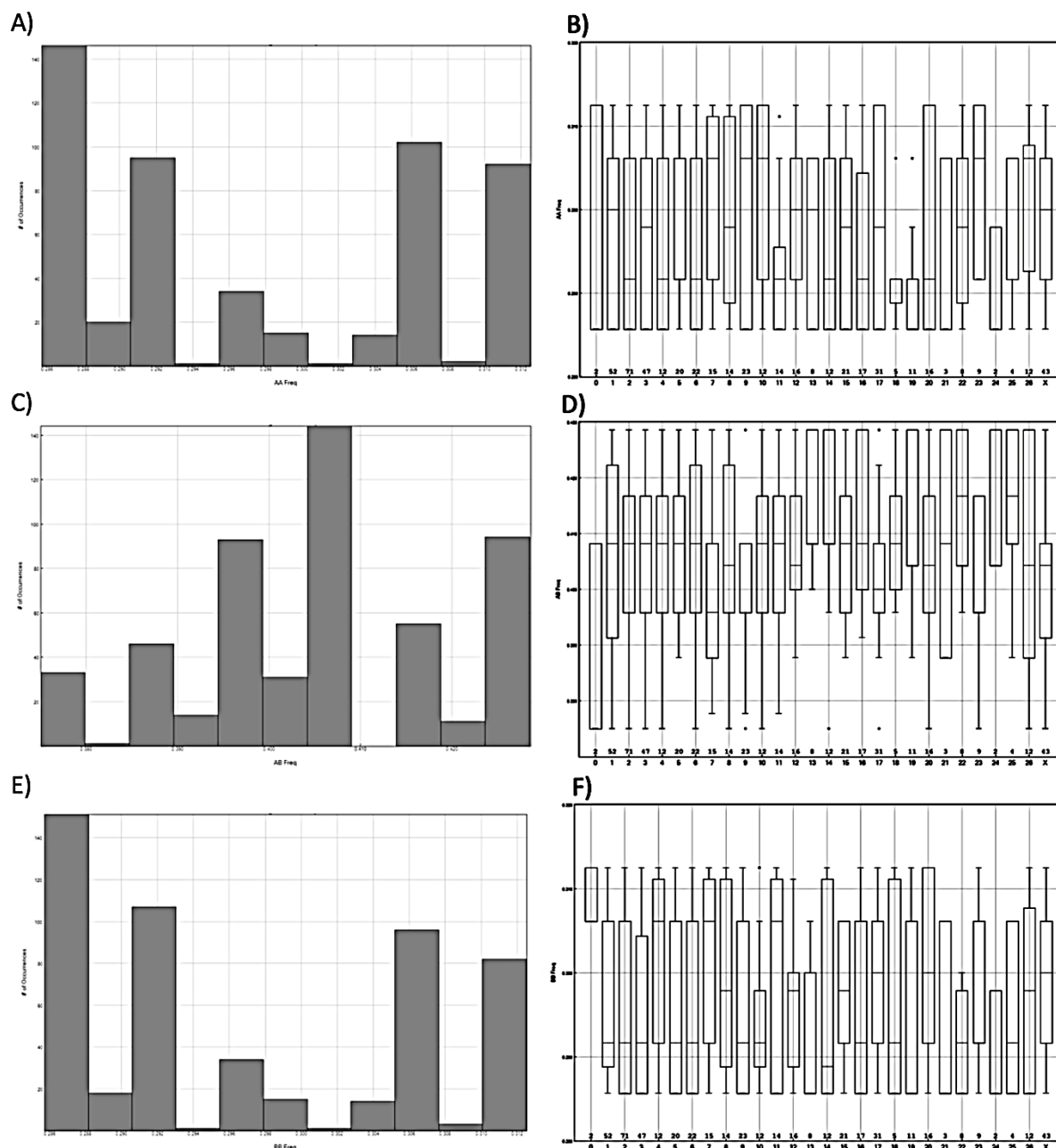


Рис. 1. Количество SNP с разной частотой встречаемости и распределение частоты встречаемости полиморфизмов на отдельных хромосомах у баранов породы маньчский меринос: А, В – «дикие» гомозиготные генотипы; С, D – гетерозиготные генотипы; Е, F – мутантные гомозиготные генотипы /

Fig. 1. The number of SNPs with different frequency of occurrence and the distribution of the frequency of occurrence of polymorphisms on individual chromosomes in rams of the Manych Merino breed: А, В – "wild" homozygous genotypes; С, D – heterozygous genotypes; Е, F – mutant homozygous genotypes

Среди мутантных гомозиготных типов, отобранных нами по критериям частоты встречаемости замен, распределение их по количеству внутри выбранного интервала, в целом, было похоже на «дикие» гомозиготные варианты (рис. 1, Е). Наибольшее количество замен приходилось на нижнюю границу интервала 0,285, а по мере приближения к верхней границе количество замен, соответствующих

этой частоте встречаемости, уменьшалось. В результате анализа распределения замен с разной частотой встречаемости, по отдельным хромосомам также было обнаружено значительное варьирование среднего показателя (рис. 1, F). Среднее значение частоты встречаемости замен на хромосомах колебалось от 0,288 на хромосоме 14 до 0,306 на хромосомах 4, 7 и 11. Минимальные значения почти не

имели различия между хромосомами и находились в пределах 0,285-0,286. Максимальные значения частоты встречаемости на хромо-

сомах также были достаточно стабильны в интервале 0,306-0,312, за исключением хромосомы 24 с показателем 0,298.

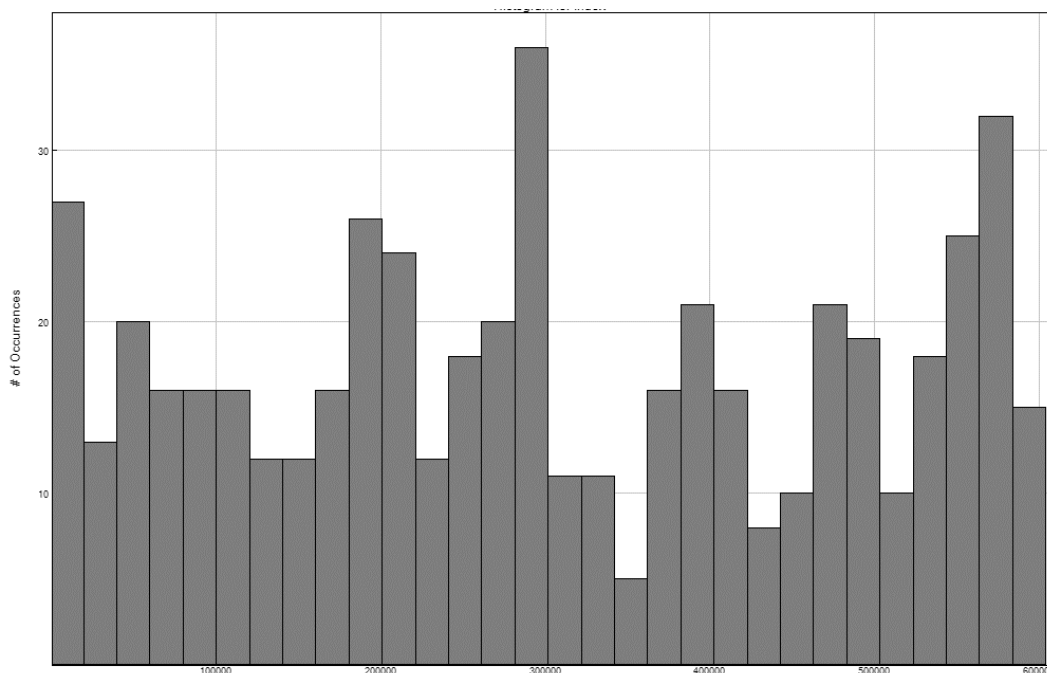


Рис. 2. Распределение выбранных для генотипирования SNP по областям генома в соответствии с индексом Illumina BeadChip Ovine 600K от 1 до 606 000 у баранов породы маньчский меринос /

Fig. 2. Distribution of SNPs selected for genotyping by genome regions according to the Illumina BeadChip Ovine 600K index from 1 to 606,000 in rams of the Manych Merino breed

Нами было изучено распределение выбранных SNP по регионам генома. Для этого использовали индексный параметр полиморфизмов по классификации Illumina Beadchip Ovine 600K (рис. 2). Индекс имел значения от 1 до 606 000 и не всегда его порядок соответствовал порядку нумерации хромосом, однако это не мешало оценивать равномерность покрытия генома. Анализ показал, что выбранные нами полиморфизмы присутствуют во всех регионах генома, представленного на ДНК-биочипе. Имелись участки с наибольшей плотностью выбранных SNP в области индексов 300 000 и пик в области 580 000. Некоторое снижение плотности покрытия полиморфизмами отмечено в регионе около индекса 350 000. Наибольшее количество полиморфизмов находилось на 1, 2, 3, 17 и X хромосомах, меньше всего их выявлено на 18, 21, 24 и 25 хромосомах. Но при этом, мы не выявили регионов, вообще не имеющих покрытия выбранными нами полиморфизмами.

В результате проведенного исследования по полногеномному генотипированию баранов

породы маньчский меринос с использованием консорциумного чипа Illumina Beadchip Ovine 600K нами были получены данные о наличии полиморфизмов в 606 000 локусах генома. Последующий анализ частоты встречаемости диких и мутантных вариантов обнаруженных SNP позволил выбрать из них наиболее подходящие для использования при генотипировании секвенированием – с достаточным количеством как гомозиготных, так и гетерозиготных вариантов в исследуемой популяции. На основании этого, нами выбрана 521 замена, отвечающая установленным критериям. Их можно в дальнейшем использовать при разработке кастомного ДНК-биочипа или для генотипирования секвенированием маньчских мериносов в ходе селекционной работы.

Набор локусов для генотипирования должен соответствовать поставленным селекционерами задачам и условиям. Наиболее распространенной задачей является оценка достоверности происхождения животных. Она также решается с использованием SNP-генотипирования. Количество локусов при этом должно

составлять не менее 100, при увеличении количества исследуемых полиморфизмов растет достоверность исследования, однако и повышается его стоимость [17]. Мы ставили задачу выбрать 400 и более замен с подходящими параметрами, что позволит в дальнейшем либо использовать их все, либо выбрать необходимое количество SNP для генотипирования секвенированием, учитывая экономическую целесообразность использования этого метода в селекции.

В качестве главного критерия была использована частота встречаемости как диких, так и мутантных гомозиготных вариантов замен. С помощью сортировки по этим параметрам в Genome Studio 2,0 исследовали несколько интервалов частоты встречаемости, середина которых приходилась на частоту 0,3. В исследовании Тортеро и др. (Tortereau et al.) частоту 0,3 считали нижним порогом при выборе полиморфизмов, но их целью являлся отбор всего 249 замен [18]. Поэтому мы снизили порог до 0,285. Использование узких интервалов не давало достаточного исходного количества замен, которое, по нашим критериям, должно было превышать 600-700 единиц (для возможности последующего отсева SNP). Более широкий интервал, наоборот, давал список из слишком большого количества замен. В итоге, мы остановились на диапазоне частот встречаемости, дающем 521 локус с близкими частотами и гомо-, и гетерозиготных генотипов в исследуемой популяции. Это близко по количеству, предлагаемому для генотипирования крупного рогатого скота. М. С. МакКлур (McClure M.C. et al.) рекомендуют для использования список из 800 полиморфизмов [17]. Понятно, что использованный нами подход является индивидуальным для исследуемой породы, однако принцип подбора SNP можно будет применить и при генотипировании других пород овец.

Изучение распределения количества выбранных SNP, в зависимости от частоты встречаемости генотипа, показало, что оно отличалось для гомозиготных и гетерозиготных вариантов. Гомозиготы в большем количестве встречались около нижней и верхних границ выбранного интервала частот. Это свидетельствует о том, что расширение интервала выбора возможно как в сторону более высокой частоты, так и в сторону меньшей частоты встречае-

мости. Изучение распределения частоты встречаемости выбранных замен по хромосомам также показало отсутствие резких колебаний средних значений. Это указывает на достаточно равномерное распределение замен по хромосомам и подтверждает целесообразность использованного подхода в выборе SNP. В целом, учитывая также наибольшее количество гетерозиготных вариантов замен со средними значениями по их интервалу, мы считаем подобранный интервал частоты встречаемости достаточно оптимальным для выбора, необходимого для массового генотипирования секвенированием количества SNP.

Для оценки эффективности покрытия генома выбранными нами заменами было использовано распределение по их индивидуальному индексу на чипе Illumina Beadchip Ovine 600K. Несмотря на то, что не все хромосомы в нем индексированы по порядку, индивидуальные индексы SNP характеризовали расположение замен на цепи ДНК в количестве 606 000 локусов. Распределение по индексам позволило сделать заключение, что выбранный нами набор замен достаточно полно характеризует все области, представленные на чипе. В исследованиях И. Хюльсегге и др. (Hulsegge I. et al.) также отмечена неравномерность распределения подходящих для генотипирования SNP по хромосомам. Имеющиеся регионы с небольшим количеством SNP, конечно, менее информативны в плане генотипирования. Однако, как отметили авторы, для подтверждения достоверности происхождения и идентификации животных это снижение информативности не критично [19].

Заключение. С использованием генотипирования баранов породы маньчжский меринос на базе Illumina BeadChip Ovine 600K были обнаружены локусы, пригодные для генотипирования секвенированием животных этой породы. Выявлены однонуклеотидные полиморфизмы с высокой частотой встречаемости в диапазоне 0,2850-0,3149 гомозигот как диких, так и мутантных вариантов. Гетерозиготные варианты этих замен встречались с частотой $0,379 \pm 0,012$. Количество соответствующих выбранным критериям полиморфизмов составило 521. Анализ расположения обнаруженных SNP в геноме овец показал их наличие по всей длине генотипируемой области ДНК. Наибольшее количество полиморфизмов

находилось на 1, 2, 3, 17 и X хромосомах, меньше всего их выявлено на 18, 21, 24 и 25 хромосомах. Полученный набор замен позволяет эффективно решать задачи подтверждения достоверности происхождения овец породы маньчжский меринос, точно идентифицировать

животных в процессе селекционной работы, проводить учет инбридинга в популяции. Предложенный нами набор SNP рекомендуется как для использования в генотипировании секвенированием нового поколения, так и для кастомизации SNP-биочипов.

References

1. 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>
2. 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>
3. 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*. 2019;9:00694. DOI: <https://doi.org/10.3389/fgene.2018.00694>
4. Braz C. U., Rowan T. N., Schnabel R. D. Genome-wide association analyses identify genotype-by-environment interactions of growth traits in Simmental cattle. *Scientific reports*. 2021;11:13335. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-92455-x>
5. Gao G., Gao N., Li S., Kuang W., Zhu L., Jiang W., Yu W., Guo J., Li Z., Yang C., Zhao Y. 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>
6. Al-Atiyat Raed M. 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>
7. Clarke S. M., Henry H. M., Dodds K. G., Jowett T. W. D., Manley T. R. 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>
8. Heaton M. P., Leymaster K. A., Kalbfleisch T. S., Kijas J. W., Clarke S. M., McEwan J., Maddox J. F., Basnayake V., Petrik D. T., Simpson B., Smith T. P. L., Chitko-McKown C. G. 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>
9. 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>
10. Ciani E., Mastrangelo S., Da Silva A., Marroni F., Ferencakovic 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(1):1-14. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12711-020-00545-7>
11. 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.
12. Gebrehiwot N. Z., Strucken E. M., Marshall K. SNP panels for the estimation of dairy breed proportion and parentage assignment in African crossbred dairy cattle, *Genetics Selection Evolution*. 2021;53(1):21. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12711-021-00615-4>
13. Brito L. F., Clarke S. M., McEwan J. C., Miller S. P., Pickering N. K., Bain W. E., Dadds K. G., Sargolzaei M., Schenkel F. S. Prediction of genomic breeding values for growth, carcass and meat quality traits in a multi-breed sheep population using a HD SNP chip. *BMC genetics*. 2017;18:7. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12863-017-0476-8>
14. Rahman M. A., Juyena N. S., Shmsuddin M. M., Bhuiyan 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>
15. Holman B. W. B., Malau-Aduli A. E. O. A Review of Sheep Wool Quality Traits. *Annual Review & Research in Biology*. 2012;2(1):1-14.
16. Purcell S., Neale B., Todd-Brown K., Thomas L., Ferreira M. A. R., Bender D., Maller J., Sklar P., de Bakker P. I. W., Daly M. J., Sham P. C. PLINK: A tool set for whole-genome association and population-based linkage analyses. *The American journal of human genetics*. 2007;81(3):559-575. DOI: <https://doi.org/10.1086/519795>
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>

18. 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>

19. Hulsege I., Schoon M., Windig J., Neuteboom M., Hiemstra S.J., Schurink A. Development of a genetic tool for determining breed purity of cattle. Livestock Science. 2019;223:60-67.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2019.03.002>

Сведения об авторах

✉ **Криворучко Александр Юрьевич**, доктор биол. наук, главный научный сотрудник, ФГБНУ «Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр», д. 49, ул. Никонова, г. Михайловск, Ставропольский край, Российская Федерация, 356241 e-mail: info@fnac.center; научный сотрудник, ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», д. 2, корп. 23, просп. Кулакова, г. Ставрополь, Российская Федерация, 355029, e-mail: info@ncfu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4536-1814>, e-mail: rcvm@yandex.ru

Лиховид Андрей Александрович, доктор географ. наук, профессор, ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», д. 2, корп. 23, просп. Кулакова, г. Ставрополь, Российская Федерация, 355029, e-mail: info@ncfu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2190-301X>

Каниболоцкая Анастасия Александровна, кандидат биол. наук, старший научный сотрудник, ФГБНУ «Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр», д. 49, ул. Никонова, г. Михайловск, Ставропольский край, Российская Федерация, 356241, e-mail: info@fnac.center, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3003-4175>

Саприкина Татьяна Юрьевна, аспирант, младший научный сотрудник, ФГБНУ «Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр», 49, ул. Никонова, г. Михайловск, Ставропольский край, Российская Федерация, 356241, e-mail: info@fnac.center, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5306-795X>

Кухарук Максим Юрьевич, кандидат биол. наук, и.о. заведующего кафедрой, ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», д. 2, корп. 23, просп. Кулакова, г. Ставрополь, Российская Федерация, 355029, e-mail: info@ncfu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4093-5807>

Яцык Олеся Андреевна, кандидат биол. наук, старший научный сотрудник, ФГБНУ «Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр», д. 49, ул. Никонова, г. Михайловск, Ставропольский край, Российская Федерация, 356241, e-mail: info@fnac.center, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2730-2482>

Information about the authors

✉ **Alexander Yu. Krivoruchko**, DSc in Biology, chief researcher, North Caucasus Federal Agrarian Research Centre, 49, Nikonova Street, Mikhailovsk, Stavropol Territory, Russian Federation, 356241, e-mail: info@fnac.center; Researcher, North Caucasus Federal University, 2, bldg. 23, ave. Kulakova, Stavropol, Russian Federation, 355029, e-mail: info@ncfu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4536-1814>, e-mail: rcvm@yandex.ru

Andrey A. Likhovid, DSc in Geographic, professor, North Caucasus Federal University, 2, bldg. 23, ave. Kulakova, Stavropol, Russian Federation, 355029, e-mail: info@ncfu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2190-301X>

Anastasia A. Kanibolotskaya, PhD in Biology, senior researcher, North Caucasus Federal Agrarian Research Centre, 49, Nikonova Street, Mikhailovsk, Stavropol Territory, Russian Federation, 356241, e-mail: info@fnac.center, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3003-4175>

Tatyana Yu. Saprikina, postgraduate student, junior researcher, North Caucasus Federal Agrarian Research Centre, 49, Nikonova Street, Mikhailovsk, Stavropol Territory, Russian Federation, 356241, e-mail: info@fnac.center, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5306-795X>

Maxim Yu. Kuharuk, PhD in Biology, acting head of the department, North Caucasus Federal University, 2, bldg. 23, ave. Kulakova, Stavropol, Russian Federation, 355029, e-mail: info@ncfu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4093-5807>

Olesya A. Yatsyk, PhD in Biology, senior researcher, North Caucasus Federal Agrarian Research Centre, 49, Nikonova Street, Mikhailovsk, Stavropol Territory, Russian Federation, 356241, e-mail: info@fnac.center, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2730-2482>

✉ – Для контактов / Corresponding author

<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.5.858-867>



УДК 637.07

Сезонные закономерности изменения антиоксидантных и микроэлементных параметров молока коров черно-пестрой породы

© 2023. А. А. Савина ✉, О. А. Воронина, С. Ю. Зайцев

ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика Л. К. Эрнста», г. о. Дубровицы, Российская Федерация

Изучение антиоксидантного статуса молока коров может дать информацию как о физиологическом состоянии продуктивного животного, так и о получаемом продукте с точки зрения его функциональной ценности, вкусовых качеств и характеристик, влияющих на хранение. Цель работы – исследование образцов молока у голштинизированных коров черно-пестрой породы с разными сроками лактации (до 30-60 дней, 60-90, 90-180, более 180 дней) на предмет активности факторов антиоксидантной защиты в течение ряда месяцев осеннего, зимнего и весеннего периодов. Суммарную концентрацию водорастворимых антиоксидантов (СКВА) молока определяли амперометрическим методом, активность церулоплазмينا (ЦП) – модифицированным методом Равина, микроэлементный состав – методом атомно-адсорбционной спектрометрии, концентрацию витамина С – титриметрическим методом, каталазное число – методом перманганатометрии. Выявлены закономерности между сезонной динамикой цинка и каталазы в молоке: в январе у группы животных со сроком лактации 30-300 дней активность каталазы и содержание цинка выше соответственно на 21,6 и 17,4 %, чем у коров со сроком лактации 15-30 дней; в феврале, наоборот, эти показатели выше у группы животных со сроком лактации 15-30 дней (на 29,6 и 30,4 % соответственно); в марте в группе животных со сроком лактации 15-30 дней активность каталазы и уровень цинка ниже (на 26,3 и 10,6 %), чем у коров со сроком лактации более 30 дней. Наблюдается снижение СКВА с увеличением количества лактационных дней. Концентрация СКВА в молоке коров, лактирующих более 180 дней, снизилась в ноябре и марте соответственно на 25,9 и 13,5 % по сравнению с периодом лактации 30-60 дней, в феврале – на 18,8 % по сравнению с животными, лактирующими 60-90 дней. Полученные данные по СКВА прямо пропорционально отражают изменения витамина С и обратно пропорционально церулоплазмину. Полученные данные могут служить важными ориентирами при определении «референтных показателей» в молоке коров.

Ключевые слова: периоды лактации, церулоплазмин, каталаза, витамин С, СКВА, медь, железо, цинк

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках выполнения Государственного задания ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика Л. К. Эрнста» (тема FGGN 0445-2021-0002).

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Савина А. А., Воронина О. А., Зайцев С. Ю. Сезонные закономерности изменения антиоксидантных и микроэлементных параметров молока коров черно-пестрой породы. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2023;24(5):858-867. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.5.858-867>

Поступила: 25.05.2023

Принята к публикации: 13.10.2023

Опубликована онлайн: 30.10.2023

Seasonal patterns of changes in antioxidant and microelement parameters of milk from black-and-white cows

© 2023. Anastasia A. Savina ✉, Oksana A. Voronina, Sergey Yu. Zaitsev

Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member L. K. Ernst, Dubrovitsy, Russian Federation

Studying the antioxidant status of cow's milk can provide information both on the physiological state of the productive animal and on the resulting product in terms of its functional value, taste and characteristics affecting storage. The purpose of the work is to study milk samples from Holstein cows of the black-and-white breed with different periods of lactation (up to 30-60 days, 60-90, 90-180, more than 180 days) for the activity of antioxidant protection factors during a number of months of autumn, winter and spring periods. The total amount of water-soluble antioxidants (TAWSA) of milk was determined by the amperometric method, the activity of ceruloplasmin by the modified Ravin method, the microelement composition by the method of atomic adsorption spectrometry, the concentration of vitamin C by the titrimetric method, and the catalase number by the permanganometry method. Patterns have been identified between the seasonal dynamics of zinc and catalase in milk: in January, in a group of animals with a lactation period of 30-300 days, catalase activity and zinc content are higher by 21.6 and 17.4 %, respectively, than in cows with a lactation period of 15-30 days; in February, on the contrary, these indicators

are higher in the group of animals with a lactation period of 15-30 days (by 29.6 and 30.4 %, respectively); in March, in the group of animals with a lactation period of 15-30 days, catalase activity and zinc levels are lower (by 26.3 and 10.6 %) than in cows with a lactation period of more than 30 days. There is a decrease in TAWSA with an increase in the number of lactation days. The concentration of TCWA in the milk of cows lactating for more than 180 days decreased in November and March, by 25.9 and 13.5 %, respectively, compared with a lactation period of 30-60 days, in February – by 18.8 % compared with animals lactating 60-90 days. The obtained data on TAWSA are directly proportional to changes in vitamin C and inversely proportional to ceruloplasmin. The data obtained can serve as important guidelines in determining “reference indicators” for cows’ milk.

Keywords: lactation periods, ceruloplasmin, catalase, vitamin C, TAWSA, copper, iron, zinc

Acknowledgments: the work was financially supported by fundamental scientific research of the Ministry of Science and Education of the Russian Federation within the state assignment of the Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member L. K. Ernst (topic FGGN 0445-2021-0002).

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

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

For citation: Savina A. A., Voronina O. A., Zaitsev S. Yu. Seasonal patterns of changes in antioxidant and microelement parameters of milk from black-and-white cows. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka*=Agricultural Science Euro-North-East. 2023;24(5):858-867. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.5.858-867>

Received: 25.05.2023

Accepted for publication: 13.10.2023

Published online: 30.10.2023

С целью повышения биологической ценности продуктов питания производится обогащение их ингредиентами, обладающими выраженными антиоксидантными свойствами. В последние годы во всем мире неуклонно растет спрос на продукты питания, содержащие природные антиоксиданты. Антиоксиданты или, другими словами, вещества, обладающие антиокислительной активностью (АОА), являются не только физиологически значимыми компонентами пищи, но и играют важную технологическую роль, так как позволяют сохранить цвет и вкус продуктов, повысить сроки их хранения или способность к переработке [1].

Указанные выше позиции являются все более важными, поскольку интенсификация молочного животноводства все более тесно сопрягается с проблемой хронического стресса и повышенной метаболической нагрузкой, следствием которой становится повышенное производство свободных радикалов в организме. За один производственный цикл корове необходимо пройти несколько фаз быстрых физиологических и метаболических адаптаций [2]. Прежде всего, эти адаптации связаны с началом лактации, достижением максимальных значений по удою, переходом в период запуска, параллельным наступлением охоты и подготовкой к новому периоду стельности, чтобы в условиях жестких сроков вернуться к началу лактации. На уровне биохимических процессов в клетке это сопряжено с увеличением активности гликолиза и последующим наступлением энергетического дефицита, переходящего в стадию истощения [2]. Негативные последствия такого «истощающего метаболизма» связаны с повышенной

продукцией свободных радикалов, «износом резерва стресс-резистентности и адаптивности». Как следствие, ухудшается физиологическое состояние животных, ослабевают естественные защитные силы организма [3, 4]. Поскольку молоко является неотъемлемым продуктом лактирующих животных, то все перечисленное отражается на составе и качестве этой биологической жидкости [5].

Значительный отклик на изменение состояния животного происходит в активности ферментов с антиоксидантными свойствами. В молоке это, чаще всего, оксидоредуктазы, выполняющие важные функции, связанные с защитой от свободных радикалов и бактерий, предотвращающих процессы перекисного окисления липидов, сохраняя тем самым качество молочных продуктов. Например, в работе [6] показана многофункциональность фермента ксантиноксидоредуктазы в реакциях детоксикации и синтеза большого количества низкомолекулярных соединений с антиоксидантной активностью (молочной кислоты, аллантина). Его универсальность заключается в способности проявлять свою активность как внутри клетки, так и за её пределами, что делает этот белок важным компонентом врожденной иммунной системы, а его консервативность поддерживается у млекопитающих эволюционно.

Основные оксидоредуктазы молока – это лактопероксидаза, каталаза, супероксиддисмутаза, глутатионпероксидаза [7], оксидаза молочной кислоты, церулоплазмин. Функциональные свойства оксидоредуктаз связаны, в первую очередь, с наличием в их структуре таких микроэлементов, как медь, цинк и железо. Благодаря высокому окислительно-восстано-

вительному потенциалу этих металлов они и проявляются в качестве антиоксидантов [8]. Помимо того, что микроэлементы входят в функциональные группы ферментов с антиоксидантной активностью, некоторые, например, медь, является ещё и кофакторами церулоплазмина, задействованного в метаболическом пути железа [9]. В свою очередь, железо включено в ряд других антиоксидантных ферментов – каталазу, пероксидазу глутатион, супероксиддисмутазу, которые «высвобождают» молекулярный кислород или его производные. И если действие «высвобожденного» кислорода не направлено на уничтожение патогенов, далее «по цепи» его нейтрализуют другие антиоксиданты: витамины С и Е, глутатион, фенольные соединения, которые содержатся в молоке.

Отдельно стоит сказать о витамине С, он не только является мощным антиоксидантом, который нейтрализует свободные радикалы, уменьшая воспалительные процессы [10], но и способствует усвоению железа и цинка, придавая им «активную форму», повышающую биологическую доступность для ферментов желудочно-кишечного тракта [11]. Тесная взаимосвязь в процессах усвоения железа и цинка приводят их к одной узкой точке «прохождения» через церулоплазмин, что при избытке цинка не позволяет железу воспользоваться своим переносчиком. Недостаток меди в корме животных может привести к недостатку её в молоке, что, в свою очередь, может повлиять на уровень железа в молоке. На это стоит обращать пристальное внимание при составлении и балансе рациона лактирующих коров. С другой стороны, повышение уровня железа и меди в молоке приводит к повышенной окислительной активности, что сопряжено с порчей продукта и потерей вкусовых качеств и питательных свойств молока [12]. Причинами их повышенного содержания может стать целый ряд причин, начиная от самых простых, вызванных фактором кормления, содержания и гигиены животных; реже – менее очевидных, связанных с транспортом и переработкой молочной продукции. Тесно взаимодействуя друг с другом, различные антиоксиданты молока обеспечивают равновесие системы, предотвращая окислительную дестабилизацию. Это положительно сказывается на здоровье потребителей [10].

Повышенное содержание железа в молоке может свидетельствовать о наличии воспалительных процессов, таких как мастит у коров,

а также о нарушении гигиены использования молочного оборудования и транспортировки молока. Как известно, ионы железа являются одними из ключевых элементов молока и играют важную роль в формировании аромата и вкуса продукта.

Недостаток меди в корме животных может привести к недостатку меди в молоке, что может в свою очередь, влиять на уровень железа в молоке. Это происходит потому, что медь необходима для активации ферментов, участвующих в метаболизме железа. Кроме того, медь участвует в образовании эпитопов на трансферрине, транспортировка железа которым зависит от экспрессии таких эпитопов. Поэтому недостаток меди может привести к изменению транспортировки железа и потенциально к снижению его биодоступности [10]. При этом как железо, так и медь обеспечивают сохранение высоких показателей качества молока в течение всего срока его хранения. С другой стороны, избыток меди в корме животных может также повлиять на содержание железа в молоке, и снизить его уровень. Это происходит потому, что избыток меди может негативно влиять на метаболизм железа и привести к накоплению железа в тканях вместо его доставки в систему кровообращения. Поэтому необходимо контролировать содержание меди в корме и поддерживать его оптимальный уровень, чтобы обеспечить правильный метаболизм микроэлементов в молоке.

Церулоплазмин (ЦП) – уникальный белок, который выступает основным доступным депо меди в организме. В период лактации его синтез увеличивается в клетках молочной железы, и он становится важным источником меди в питании новорожденного [13]. В качестве транспортной молекулы церулоплазмин работает не только с железом [14], но и цинком [13], а также медью [15] и потенциально с другими металлами, чья валентность проявляется как 2⁺.

При недостатке церулоплазмина уровень железа в молоке может быть снижен, что вероятно приводит к негативным последствиям для здоровья новорожденного [9]. Церулоплазмин также играет важную роль в системе антиоксидантной защиты, медь и железо в его составе помогают остановить окислительные процессы в организме и предотвратить образование свободных радикалов [14]. Механизм транспортировки церулоплазмином железа состоит из связывания железа с трансферрином, затем связывание церулоплазмина с транс-

феррином и высвобождение железа в ткани и органы организма. Церулоплазмин также может связывать цинк в небольших количествах, который присоединяется к остатку гистидина [9]. Таким образом, церулоплазмин связывает медь, играя важную роль в транспортировке ее и железа в организме, но также может связывать в небольших количествах цинк [14]. Цинк является важным элементом питания и играет заметную роль в биохимических процессах, происходящих в организме. Он также является кофактором многих ферментов и может быть частью структуры некоторых белков. В молоке содержится несколько различных цинксодержащих белков, включая: α -лактальбумин – главный белок сыворотки молока, который содержит большое количество цинка и играет важную роль в развитии и росте младенцев. β -лактоглобулин – другой белок сыворотки молока, содержащий цинк [16], важный минерал, кальций, который необходим для здоровья костей. Казеин: основные белки, образующие казеиновый комплекс молока, также содержат цинк в своей структуре. Церулоплазмин – это белок, который связывается с цинком и играет значительную роль в транспортировке металла через кровь. Супероксиддисмутаза – это фермент, который содержит цинк в своей структуре и играет существенную роль в защите организма от свободных радикалов.

Цинксодержащие белки, обнаруженные в молоке, играют важную роль в росте и развитии младенцев, а также в общем здоровье человека. Они участвуют в метаболизме железа, защите от свободных радикалов, обеспечивают нормальное функционирование многих ферментов и других биологических процессов.

Таким образом, указанные ММЭ (медь, железо, цинк), а также аскорбиновая кислота и церулоплазмин, представленные в молоке, могут взаимодействовать между собой. Исследования показывают, что аскорбиновая кислота может значительно увеличить всасывание цинка в организм, предотвращая его потерю через мочу и фекалии. Это связано с тем, что витамин С уменьшает окислительное воздействие на цинк, что приводит к его стабилизации и улучшению всасывания в кишечнике. Количество микроэлементов в молоке может быть связано с качеством корма и состоянием здоровья животных, а также с условиями их содержания. Однако уровень оксидоредуктаз в молоке может варьировать в зависимости от ряда фак-

торов, таких как питание, физиологическое состояние, условия хранения молока и процесса его переработки. Например, церулоплазмин может связываться как с медью, так и с цинком и транспортировать их к тканям организма [9].

Цель работы – исследование образцов молока коров с разными сроками лактации на предмет активности факторов антиоксидантной защиты в течение ряда месяцев осеннего, зимнего и весеннего периодов.

Новизна исследований – попытка оценить вклад отдельных антиоксидантов в суммарную концентрацию водорастворимых антиоксидантов, рассмотрев количественные изменения в разные периоды лактации на примере ряда месяцев осеннего, зимнего и весеннего периодов.

Материал и методы. Для реализации данного исследования в условиях хозяйства «Ладожское» Краснодарского края был отобран 141 образец молока от «голландизированных» коров черно-пестрой породы. В каждом из трех изученных месяцев (ноябрь, февраль, март) разных сезонов животные по срокам лактации были разделены на 4 группы: первая – 30-60 дней, вторая – 60-90 дней, третья – 90-180, четвертая – более 180, но менее 300 дней. Пробы молока содержали стабилизатор.

Измерение концентрации витамина С осуществляли титриметрическим методом. В качестве титранта использовали 0,001 н раствор 2,6-дихлорфенолиндофенола. Пробоподготовку молока осуществляли путем получения сыворотки методом высаливания. К 12,5 мл молока добавляли 1 мл насыщенной щавелевой кислоты и 2,5 мл насыщенного раствора хлорида натрия. Полученный осадок отделяли с помощью предварительно смоченной широкопористой фильтровальной бумаги. Полученный фильтрат титровали трехкратно, используя по 5 мл на образец до появления розовой окраски. Концентрацию аскорбиновой кислоты рассчитывали по формуле:

$$X = (0,088 \cdot A \cdot V_{\text{смеси}} \cdot 1000) / V_{\text{выт}} \cdot V_{\text{пробы}},$$

где X – искомая концентрация витамина, мг/л; 0,088 – масса витамина С, эквивалентная 1 мл 0,001 н раствора 2,6-дихлорфенолиндофенола, мг; $V_{\text{смеси}}$ – объем фильтрата, кислоты и соли, мл; $V_{\text{выт}}$ – объем фильтрата; $V_{\text{пробы}}$ – объем фильтрата, пошедшего на одно титрование.

Пара-фенилендиамин-оксидазную активность церулоплазмينا определяли по модифицированному методу Равина. Для этого к 3,2 мл 0,5 М натрий-ацетатного буферного раствора

с pH 5,5 добавляли 400 мкл 0,5%-го свежеприготовленного водного раствора солянокислого пара-фенилендиамина и 50 мкл гомогенного молока, перемешивали. Реакцию проводили в течение 60 минут в термостате при 37 °С, затем 60 минут пробы остывали в холодильнике при +4 °С. Реакцию останавливали 0,5%-ным раствором азидата натрия (200 мкл). Контрольной пробой служила реакционная смесь, в которой вместо пара-фенилендиамина был добавлен аналогичный объем буферного раствора. После инкубации пробы центрифугировали при 12000 об/мин в течение 10 минут. Пробу для анализа отбирали с помощью медицинского шприца, чтобы не допустить смешивания с отделившимся жировым слоем. Прозрачную окрашенную пробу исследовали на спектрофотометре при 530 нм против контрольной. Полученный результат при умножении на 0,875 дает концентрацию ЦП, мг/мл.

Изучение активности каталазы. Каталазное число исследовали методом перманганатометрии. Для этого 400 мкл гомогенного молока разводили в 20-ти мл дистиллированной воды. Контрольную колбу с таким же содержанием доводили до кипения для инактивации фермента. После остывания (30 мин) в оба образца добавляли по 5 мл 0,3%-ной перекиси водорода. Перемешивали. Образцы помещали в термостат при 25 °С на 30 минут. После инкубации вносили по 1 мл 10%-ой серной кислоты для остановки реакции и закисления среды. Титровали раствором перманганата натрия (0,1 моль/л) до появления стабильного розового окрашивания.

Расчет проводили по формуле:

$$A_k = (V_k - V_o) \cdot 1,7 / m \cdot t \cdot 0,034,$$

где V_k – объем раствора перманганата калия, израсходованного на титрование контрольной пробы, мл; V_o – объем раствора перманганата калия, пошедшего на титрование опытной пробы, мл; 1,7 – масса пероксида водорода, соответствующего 1 мл раствора перманганата калия с эквивалентной концентрацией 0,1 моль/л, мг; m – объем молока, мл; t – продолжительность инкубации молока с пероксидом водорода, мин; 0,034 – масса 1 мкМ пероксида водорода, мг.

Для исследования антиоксидантных свойств в молоке была определена суммарная концентрация водорастворимых антиокси-

дантов (СКВА) с использованием проточной инъекционной системы «Цвет-Яуза 01-АА» с амперометрическим детектированием окислительной способности растворов веществ. Определение СКВА выполнено по модифицированной методике¹. Окисление биологических молекул разведенного в 20 раз молока происходит на поверхности рабочего стеклоуглеродного электрода при заданном потенциале ($U = 1,3$ В), фоновый ток не превышал 70 нА. Антиоксидантную активность вещества определяли по площади пика (нА*с). Для создания калибровочной кривой был взят диапазон измерений массовой концентрации галловой кислоты от 0,2 до 4 (мг/л). Показатель повторяемости (относительное среднеквадратичное отклонение повторяемости для площади пиков) был задан $\leq 5\%$ [17]. Определение микроэлементов проводили на атомно-адсорбционном спектрометре ZEEnit 650 P (Analytik Jena AG, Германия).

Для статистической обработки результатов использовали критерий Манна-Уитни.

Результаты и их обсуждение. Метод измерения суммарной концентрации водорастворимых антиоксидантов основан на определении силы электрического тока, возникающего в момент окисления молекул на поверхности рабочего электрода. Измеряется в относительных единицах массовой концентрации, эквивалентной общепринятому стандарту – галловой кислоте [18]. Этот показатель является интегральным и для полного понимания его значимости необходимо оценить вклад некоторых индивидуальных факторов антиоксидантной защиты молока. Поэтому в течение трех месяцев – ноября, февраля и марта мы проанализировали два металлосодержащих фермента и витамин С. Метаболические пути этих веществ в организме взаимосвязаны, что уже описано выше в литобзоре, однако открытым вопросом остается степень их взаимодействия в молоке. Кроме того, в дальнейшем нами было рассмотрено содержание в молоке микроэлементов, входящих в состав данных ферментов.

Рассмотрим содержание антиоксидантов в молоке коров на примере трех месяцев, относящихся к разным сезонам, начиная с ноября (табл. 1).

¹Методика выполнения измерений содержания антиоксидантов в напитках и пищевых продуктах, биологически активных добавках, экстрактах лекарственных растений амперометрическим методом. ОАО НПО «Химвавтоматика». М., 2007. С. 7-9.

**Таблица 1 – Показатели антиоксидантной системы молока коров в ноябре /
Table 1 – Indicators of the milk antioxidant system in November**

Группа / Group	Период лактации / Lactation period	СКВА, мг-экв/л / TAWSA, mg-eq/l	ЦП, мг/мл / CP, mg/ml	Каталаза, ед / Catalase, unit	Витамин С, мг/л / Vitamin C, mg/l
1	30-60 дней, n = 9 / 30-60 days, n = 9	17,08±0,91	0,465±0,152	2,24±0,76	6,97±1,23
2	60-90 дней, n = 7 / 60-90 days, n = 7	15,44±0,73*	0,480±0,167*	2,03±0,54*	5,65±0,97*
3	90-180 дней, n = 15 / 90-180 days, n = 15	14,56±0,68*	0,473±0,160	2,54±0,61	4,66±0,76
4	> 180 дней, n = 10 / > 180 days, n = 10	12,66±0,51*	0,823±0,198*	2,5±0,79	4,53±0,53*

*Различия достоверны по отношению к предыдущей группе при $p < 0,05$ /

*The differences are significant in relation to the previous group at $p < 0.05$

В ноябре концентрация водорастворимых антиоксидантов в молоке достоверно ($p < 0,05$) уменьшилась с увеличением срока лактации. Разница между первой и четвертой группами составила 25,9 %. Синхронно со СКВА уменьшилась и концентрация витамина С в молоке на 35 %. Уровень церулоплазмينا в молоке коров со сроком лактации 30-180 дней относительно стабилен и находился в диапазоне 0,465-0,480 мг/мл. Для группы коров с периодом лактации более 180 дней отмечалось повышение активности ЦП до 0,823 мг/мл, активность каталазы изменялась в диапазоне 20 %.

В феврале (табл. 2) мы наблюдали увеличение СКВА во второй ($p < 0,05$) и третьей группах относительно первой, однако коровы со сроком лактации более 180 дней в данном месяце равноценны по этому показателю первой группе. Стоит отметить, что увеличение СКВА сопровождалось также повышением количества ЦП и снижением каталазной активности молока (2-3 группа). Снижение показателя СКВА для первой группы сопровождалось относительно низким значением ЦП по отношению ко второй группе, но повышенной активностью каталазы.

**Таблица 2 – Показатели антиоксидантной системы молока коров в феврале /
Table 2 – Indicators of the milk antioxidant system in February**

Группа / Group	Период лактации / Lactation period	СКВА, мг-экв/л / TAWSA, mg-eq/l	ЦП, мг/мл / CP, mg/ml	Каталаза, ед / Catalase, unit	Витамин С, мг/л / Vitamin C, mg/l
1	30-60 дней, n = 9 / 30-60 days, n = 9	14,28±0,72	0,176±0,042	1,08±0,078	5,13±1,62
2	60-90 дней, n = 7 / 60-90 days, n = 7	17,41±0,87*	0,256±0,055*	0,68±0,034*	4,32±0,56*
3	90-180 дней, n = 15 / 90-180 days, n = 15	17,77±0,89	0,256±0,061	0,58±0,028	4,58±0,87
4	> 180 дней, n = 10 / > 180 days, n = 10	14,13±0,71*	0,242±0,048*	1,28±0,09*	4,53±0,20

*Различия достоверны по отношению к предыдущей группе при $p < 0,05$ /

*The differences are significant in relation to the previous group at $p < 0.05$

В марте (табл. 3), как и в ноябре, с увеличением лактационного периода отмечается достоверное ($p < 0,05$) уменьшение значений СКВА. Наименьшее значение антиоксидантной активности у коров со сроком лактации более 180 дней – на 13,4 % ниже по отношению к первой группе. Аналогично происходит сни-

жение витамина С. Каталаза и церулоплазмин незначительно изменяются, однако, как и в предыдущие месяцы, наибольшее значение ЦП отмечается у коров, лактирующих более 180 дней (23,3 % между первой и четвертой группами).

*Таблица 3 – Показатели антиоксидантной системы молока коров в марте /
Table 3 – Indicators of the milk antioxidant system in March*

Группа / Group	Период лактации / Lactation period	СКВА, мг-экв/л / TAWSA, mg-eq/l	ЦП, мг/мл / CP, mg/ml	Каталаза, ед / Catalase, unit	Витамин С, мг/л / Vitamin C, mg/l
1	30-60 дней, n = 9 / 30-60 days, n = 9	17,8±0,89	0,214±0,125	0,94±0,41	7,40±1,06
2	60-90 дней, n = 7 / 60-90 days, n = 7	16,3±0,82*	0,271±0,094*	0,90±0,52*	6,85±1,26*
3	90-180 дней, n = 15 / 90-180 days, n = 15	16,5±0,72*	0,279±0,038*	1,0±0,51	4,73±0,83*
4	> 180 дней, n = 10 / > 180 days, n = 10	15,4±0,69*	0,279±0,039*	0,92±0,47*	4,55±0,45

*Различия достоверны по отношению к предыдущей группе при $p < 0,05$ /

*The differences are significant in relation to the previous group at $p < 0.05$

Активность ферментативной защитной системы организма молочных животных варьируется от продуктивности, кормления, наличия сопутствующих заболеваний и других факторов, воздействующих на организм. Зачастую показатели СКВА и витамина С наиболее высоки для коров, лактирующих 1-2 месяца, поэтому проверен и сопоставлен микроэлементный состав молока (по показателям цинка, меди и железа) и изучаемые нами антиоксидантные

показатели для ранних и поздних сроков лактации (менее 30 и более 30 дней). В январе численность групп составила 9 и 13 проб молока, взятых у коров, лактирующих менее 30 и более 30 дней соответственно, в феврале – 7 и 15, в марте 7 и 20.

В таблице 4 приведены микроэлементный состав молока и антиоксидантные показатели в разные месяцы лактации для 2 групп (менее 30 и более 30 дней, но не превышая 300-го дня).

*Таблица 4 – Содержание микроэлементов и антиоксидантов в молоке коров в разные периоды лактации /
Table 4 – The content of trace elements and antioxidants in the milk of cows in different periods of lactation*

Показатель / Indicator	Январь / January		Февраль / February		Март / March	
	< 30 дней / < 30 days	> 30 дней / > 30 days	до 30 дней / < 30 days	> 30 дней / > 30 days	до 30 дней / < 30 days	> 30 дней / > 30 days
Zn, мкг/л / Zn, mkg/l	5256±829	6357±1593*	6647±965	4623±697*	2610±580	2971±426
Cu, мкг/л / Cu, mkg/l	194±52	172±36	172±28	169±34	83±10	84±19
Fe, мкг/л / Fe, mkg/l	5087±543	5048±573	4667±265	5245±841	3750±382	4194±891*
СКВА мг-экв/л / TCWA mg-eq/l	16,61±3,51	15,12±1,67	10,12±2,86	13,89±5,89*	18,24±1,84	15,98±3,85*
КАТ, ед / KAT, unit	0,76±0,031	0,97±0,45*	1,08±0,78	0,76±0,41*	0,70±0,14	0,96±0,024*
ЦП, мг/мл / CP mg/ml	0,205±0,055	0,266±0,113*	0,176±0,042	0,235±0,059*	0,186±0,012	0,283±0,038*

*Различия достоверны по отношению к предыдущей группе (в рамках одного месяца) при $p < 0,05$ / The differences are significant in relation to the previous group (within one month) at $p < 0.05$

Железо в коровьем молоке присутствует в небольших количествах и является компонентом белка лактоферрина и каталазы, которые связаны с мембраной жировых шариков. В других исследованиях отмечались сезонные колебания микроэлементов, связанные с долгим хранением кормов в зимний период, в результате которого беднеет их микроэлементный состав [19]. В нашем случае отмечалось однозначное

снижение показателей микроэлементов к марту. Интересно, что по литературным данным [19], содержание цинка в молоке в различные сроки лактационного периода также неодинаково – содержание цинка постепенно снижается и вновь несколько повышается к концу дойного периода. Эти данные подтверждают полученные нами результаты. Известно, что цинк способен замещать лабильные атомы меди в молекуле

ЦП [9], содержание которого, по нашим данным, повышается у коров после 180 дня лактации в диапазоне изученных месяцев.

Можно проследить синхронную динамику изменения количества цинка в молоке и каталазной активности в январе, феврале и марте. Активность каталазы в январе выше у группы животных более 30 дней лактации на 21,6 %, уровень цинка выше 17,4 %; в феврале, наоборот, уровень каталазы выше в первой группе на 29,6 %, а цинка – на 30,4 %, в марте активность каталазы в первой группе ниже на 26,3 %, а уровень цинка – на 10,6 %.

Заключение. В результате данного исследования были выявлены закономерности планового увеличения количества церулоплазмينا в молоке коров с увеличением дней лактации в осенний, зимний и весенний периоды. Обнаружена обратная динамика для суммарной концентрации водорастворимых антиоксидантов, а также витамина С. Схожие динамики количественных колебаний найдены для каталазы и цинка. Обнаружены основные закономерности:

– количество церулоплазмينا в молоке коров в ноябре в период раздоя выше, чем после 180-го дня лактации на 43,5 %, в феврале – на 27,3 %, а в марте – на 23,3 %.

– показатель «активность каталазы» в первой группе коров в ноябре выше, чем в четвертой – на 10,4 %, в феврале – на 15,6 %, в марте – на 2,1 %. Более высокая активность каталазы у коров в первой группе может быть связана с их более эффективным оксидативным обменом и обеспечением антиоксидантной защиты.

– содержание СКВА в молоке у коров первой группы в ноябре ниже, чем во второй на 25,88 %, в феврале – на 1,1 %, в марте – на 13,4 %. Это может указывать на различия в обмене ОАА между группами коров или в их протеиновом метаболизме.

– содержание витамина С в молоке коров первой группы в ноябре ниже, чем во второй на 35,0 %, в феврале – на 11,7 %, в марте – на 38,5 %. Это может указывать на недостаток витамина С в питании коров в первой группе или на усиленную потребность витамина С, вызванную определенными факторами окружающей среды или стрессом.

Полученные данные могут служить важными ориентирами при определении «референтных показателей» указанных выше антиоксидантов при анализе молока коров.

Список литературы

1. Добриян Е. И. Антиоксидантная система молока. Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2020;82(2):101-106. DOI: <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2020-2-101-106> EDN: APWYTU
2. Bradford B. J., Allen M. S. Negative energy balance increases periparturient ghrelin and growth hormone concentrations in lactating dairy cows. Domestic Animal Endocrinology. 2008;34(2):196-203. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.domaniend.2007.02.002>
3. Остренко К. С. Проблемы интенсификации животноводства и пути их решения. Современное состояние, проблемы и перспективы развития аграрной науки: мат-лы V Междунар. научн.-практ. конф. Симферополь: ООО «Изд-во Типография «Ариал», 2020. С. 287-289. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44115461> EDN: ORFIZX
4. Long J., Liu Y., Zhou X., He L. Dietary serine supplementation regulates selenoprotein transcription and selenoenzyme activity in pigs. Biological Trace Element Research. 2021;199:148-153. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12011-020-02117-8>
5. Скрипниченко Г. Г., Добровольский Ю. Н., Добровольская Н. Е. Теоретические и практические аспекты генетического полиморфизма в молочном скотоводстве. Ветеринария, зоотехния и биотехнология. 2017;(1):64-70. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28356244> EDN: XWNNBR
6. Vorbach C., Harrison R., Capecchi M. R. Xanthine oxidoreductase is central to the evolution and function of the innate immune system. Trends in immunology. 2003;24(9):512-517. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1471-4906\(03\)00237-0](https://doi.org/10.1016/S1471-4906(03)00237-0)
7. Погорелова Н. А., Высокогорский В. Е. Активность ферментов антиокислительной системы крови и молока коров при эндометрите. Вестник АПК Ставрополя. 2016;(4(24)):71-75. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/aktivnost-fermentov-antiokislitelnoy-sistemy-krovi-i-moloka-korov-pri-endometrite>
8. Collins J. F., Prohaska J. R., Knutson M. D. Metabolic crossroads of iron and copper. Nutrition reviews. 2010;68(3):133-147. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1753-4887.2010.00271.x>
9. Puchkova L. V., Babich P. S., Zatulovskaya Y. A., Ilyechova E. Y., Di Sole F. Copper metabolism of newborns is adapted to milk ceruloplasmin as a nutritive source of copper: Overview of the current data. Nutrients. 2018;10(11):1591. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6266612/>
10. Lindmark-Månsson H., Åkesson B. Antioxidative factors in milk. British Journal of Nutrition. 2000;84(S1):103-110. URL: <https://www.cambridge.org/core/journals/british-journal-of-nutrition/article/antioxidative-factors-in-milk/ED9FF93ADFC95E48F36780EE602505B1>
11. Вапиров В. В., Вапирова Н. В., Насонова С. П. Физико-химические свойства, биологическая роль и элементный статус по меди жителей северных регионов России. Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 2018;(8(177)):101-104. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/fiziko-himicheskie-svoystva-biologicheskaya-rol-i-elementnyy-status-po-medi-zhiteley-severnyh-regionov-rossii>

12. Воронина О. А., Боголюбова Н. В., Зайцев С. Ю. Минеральные элементы в составе молока коров – мини-обзор. Сельскохозяйственная биология. 2022;57(4):681-693. DOI: <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2022.4.681rus> EDN: BMBZXD
13. Пучкова Л. В., Алейникова Т. Д., Цымбаленко Н. В., Захарова Е. Т., Конопитцева Л. А., Чеботарь Н. А., Гайцхоки В. С. Биосинтез и секреция церулоплазмينا клетками молочной железы в период лактации у крыс. Биохимия. 1994;59(2):296-303. Режим доступа: <https://biochemistrymoscow.com/ru/archive/1994/59-02-0296/>
14. Белова С. В., Карякина Е. В. Церулоплазмин-структура, физико-химические и функциональные свойства. Успехи современной биологии. 2010;130(2):180-189. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=13917517> EDN: LSOMLD
15. Ващенко В. И., Ващенко Т. Н. Церулоплазмин от метаболита до лекарственного средства. Психофармакология и биологическая наркология. 2006;6(3):1254-1269. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/tseruloplazmin-ot-metabolita-do-lekarstvennogo-sredstva>
16. Нотова С. В., Маршинская О. В., Казакова Т. В. Роль микроэлементов в антиоксидантной системе защиты организма. Животноводство и кормопроизводство. 2023;106(1):183-191. DOI: <https://doi.org/10.33284/2658-3135-106-1-183> EDN: UGCKAO
17. Савина А. А., Воронина О. А., Боголюбова Н. В., Зайцев С. Ю. Амперометрическое детектирование антиоксидантной активности модельных и биологических жидкостей. Вестник Московского университета. Серия 2: Химия. 2020;61(6):429-437. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43083726> EDN: GYQHRE
18. Тринеева О. В. Методы определения антиоксидантной активности объектов растительного и синтетического происхождения в фармации (обзор). Разработка и регистрация лекарственных средств. 2017;(4):180-197. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30611794> EDN: ZTWVEX
19. Кузнецова Т. В., Глебова И. В. Содержание и форма соединения микроэлементов в молоке и молочных продуктах. Научное обеспечение агропромышленного производства: мат-лы Междунар. научн.-практ. конф. Курск: Курская ГСХА имени И. И. Иванова, 2012. Т. Ч. 3. С. 76-79. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24372020> EDN: UNIQVV

References

1. Dobriyan E. I. Dairy antioxidant system. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologii* = Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2020;82(2):101-106. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2020-2-101-106>
2. Bradford B. J., Allen M. S. Negative energy balance increases periprandial ghrelin and growth hormone concentrations in lactating dairy cows. *Domestic Animal Endocrinology*. 2008;34(2):196-203. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.domaniend.2007.02.002>
3. Ostrenko K. S. Problems of animal husbandry intensification and ways to solve them. Current state, problems and prospects for the development of agricultural science: materials of the V Intern. scientific-practical conf. Simferopol': *OOO «Izd-vo Tipografiya «Arial»*, 2020. pp. 287-289. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44115461>
4. Long J., Liu Y., Zhou X., He L. Dietary serine supplementation regulates selenoprotein transcription and selenoenzyme activity in pigs. *Biological Trace Element Research*. 2021;199:148-153. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12011-020-02117-8>
5. Skripnichenko G. G., Dobrovolskiy Yu. N., Dobrovolskaya N. E. Theoretical and practical aspects of genetic polymorphism in dairy cattle. *Veterinariya, zootekhnika i biotekhnologiya* = Veterinary Medicine, Zootechnics and Biotechnology. 2017;(1):64-70. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28356244>
6. Vorbach C., Harrison R., Capocchi M. R. Xanthine oxidoreductase is central to the evolution and function of the innate immune system. *Trends in immunology*. 2003;24(9):512-517. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1471-4906\(03\)00237-0](https://doi.org/10.1016/S1471-4906(03)00237-0)
7. Pogorelova N. A., Vysokogorskiy V. E. The activity of enzymes of antioxidant system blood and milk of cows with endometritis. *Vestnik APK Stavropol'ya* = Agricultural Bulletin of Stavropol Region. 2016;(4(24)):71-75. (In Russ.). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/aktivnost-fermentov-antiokislitelnoy-sistemy-krovi-i-moloka-korov-pri-endometrite>
8. Collins J. F., Prohaska J. R., Knutson M. D. Metabolic crossroads of iron and copper. *Nutrition reviews*. 2010;68(3):133-147. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1753-4887.2010.00271.x>
9. Puchkova L. V., Babich P. S., Zatulovskaia Y. A., Ilyechova E. Y., Di Sole F. Copper metabolism of newborns is adapted to milk ceruloplasmin as a nutritive source of copper: Overview of the current data. *Nutrients*. 2018;10(11):1591. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6266612/>
10. Lindmark-Månsson H., Åkesson B. Antioxidative factors in milk. *British Journal of Nutrition*. 2000;84(S1):103-110. URL: <https://www.cambridge.org/core/journals/british-journal-of-nutrition/article/antioxidative-factors-in-milk/ED9FF93ADFC95E48F36780EE602505B1>
11. Vapirov V. V., Vapirova N. V., Nasonova S. P. Review of physical and chemical properties, biological role and element status of copper in the inhabitants of Russia's northern regions. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta* = Proceedings of Petrozavodsk State University. 2018;(8(177)):101-104. (In Russ.). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/fiziko-himicheskie-svoystva-biologicheskaya-rol-i-elementnyy-status-po-medi-zhiteley-severnoy-regionov-rossii>
12. Voronina O. A., Bogolyubova N. V., Zaitsev S. Y. Mineral composition of cow milk – a mini review. *Sel'skokhozyaystvennaya biologiya* = Agricultural Biology. 2022;57(4):681-693. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2022.4.681rus>

13. Puchkova L. V., Aleynikova T. D., Tsymbalenko N. V., Zakharova E. T., Konopittseva L. A., Chebotar' N. A., Gaytskhoki V. S. Biosynthesis and secretion of ceruloplasmin in mammary cells of lactating rats. *Biokhimiya*. 1994;59(2):296-303. (In Russ.). URL: <https://biochemistrymoscow.com/ru/archive/1994/59-02-0296/>
14. Belova S. V., Karyakina E. V. Ceruloplasmin, its structure and physicochemical and functional properties. *Uspekhi sovremennoy biologii*. 2010;130(2):180-189. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=13917517>
15. Vashchenko V. I., Vashchenko T. N. Tseruloplazmin ot metabolita do lekarstvennogo sredstva. *Psikhofarmakologiya i biologicheskaya narkologiya* = Psychopharmacology & biological narcology. 2006;6(3):1254-1269. (In Russ.). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tseruloplazmin-ot-metabolita-do-lekarstvennogo-sredstva>
16. Notova S. V., Marshinskaya O. V., Kazakova T. V. The role of trace elements in the antioxidant defense system of organism. *Zhivotnovodstvo i kormoproizvodstvo* = Animal Husbandry and Fodder Production. 2023;106(1):183-191. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.33284/2658-3135-106-1-183>
17. Savina A. A., Voronina O. A., Bogolyubova N. V., Zaytsev S. Yu. Amperometric detection of antioxidant activity of model and biological fluids. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 2: Khimiya*. 2020;61(6):429-437. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43083726>
18. Trineeva O. V. Methods of determination of antioxidant activity of plant and synthetic origins in pharmacy (review). *Razrabotka i registratsiya lekarstvennykh sredstv* = Drug development & registration. 2017;(4):180-197. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30611794>
19. Kuznetsova T. V., Glebova I. V. Content and form of microelements in milk and dairy products. Scientific support of agro-industrial production: materials of the International. scientific-practical conf. Kursk: *Kurskaya GSKhA imeni I. I. Ivanova*, 2012. Vol. Part. 3. pp. 76-79. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24372020>

Сведения об авторах

✉ **Савина Анастасия Анатольевна**, младший научный сотрудник отдела физиологии и биохимии сельскохозяйственных животных, ФГБНУ «Федеральный научный центр животноводства – ВИЖ имени академика Л. К. Эрнста», п. Дубровицы, д. 60, г. о. Подольск, Московская область, Российская Федерация, 142132, e-mail: priemnaya-vij@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0257-1643>, e-mail: KiraBlackFire@mail.ru

Воронина Оксана Александровна, кандидат биол. наук, старший научный сотрудник отдела физиологии и биохимии сельскохозяйственных животных, ФГБНУ «Федеральный научный центр животноводства – ВИЖ имени академика Л. К. Эрнста», п. Дубровицы, д. 60, г. о. Подольск, Московская область, Российская Федерация, 142132, e-mail: priemnaya-vij@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6774-4288>

Зайцев Сергей Юрьевич, доктор хим. наук, доктор биол. наук, ведущий научный сотрудник отдела физиологии и биохимии сельскохозяйственных животных, ФГБНУ «Федеральный научный центр животноводства – ВИЖ имени академика Л. К. Эрнста», п. Дубровицы, д. 60, г. о. Подольск, Московская область, Российская Федерация, 142132, e-mail: priemnaya-vij@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1533-8680>

Information about authors

✉ **Anastasia A. Savina**, junior researcher, the Department of Physiology and Biochemistry of Farm Animals, Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member L. K. Ernst, Dubrovitsy 60, Podolsk Municipal District, Moscow Region, Russian Federation, 142132, e-mail: priemnaya-vij@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0257-1643>, e-mail: KiraBlackFire@mail.ru

Oksana A. Voronina, PhD in Biological Science, senior researcher, the Department of Physiology and Biochemistry of Farm Animals, Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member L. K. Ernst, Dubrovitsy 60, Podolsk Municipal District, Moscow Region, Russian Federation, 142132, e-mail: priemnaya-vij@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6774-4288>

Sergey Yu. Zaitsev, DSc in Chemical Science, DSc in Biological Science, professor, leading researcher, the Department of Physiology and Biochemistry of Farm Animals, Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member L. K. Ernst, Dubrovitsy 60, Podolsk Municipal District, Moscow Region, Russian Federation, 142132, e-mail: priemnaya-vij@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1533-8680>

✉ – Для контактов / Corresponding author

МЕХАНИЗАЦИЯ, ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ, АВТОМАТИЗАЦИЯ / MECHANIZATION, ELECTRIFICATION, AUTOMATION

<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.5.868-876>
УДК 629.032:631.372



Методика расчета давления на почву колесных тракторов

© 2023. В. Ю. Ревенко ✉, А. Н. Назаров, В. И. Скорляков

ФГБНУ «Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса», п. Правдинский, Московская область, Российская Федерация

Российский рынок тракторной техники в последние годы переживает самую масштабную трансформацию в новейшей истории. На рынке появилось множество новых поставщиков, происходит ускоренная замена ушедших брендов на российские аналоги и технику из дружественных стран. Оценить всё это количественное и качественное разнообразие тракторов, предлагаемых сельхозтоваропроизводителям через систему машиноиспытаний, весьма проблематично, особенно с учетом наличия у каждого производителя большого количества типоразмерных рядов энергосредств. Тем не менее, покупатель должен иметь доступ к информации об основных потребительских свойствах и степени эффективности того или иного образца техники. В статье предлагается расчетный метод оценки одного из важнейших функциональных показателей тракторной техники, а именно – уровня воздействия её движителей на почву с использованием ограниченной исходной информации: технической характеристики и эксплуатационной документации завода-изготовителя. Приведенный в тексте алгоритм прошел апробацию во время испытаний реальных образцов тракторной техники. Несущественные различия в оценке максимального давления на почву, полученные в результате измерений и расчетов (разница составляет 1,9-3,3 %) свидетельствуют о высокой степени достоверности разработанной методики, а также о возможности её применения в инженерной практике для оценки функциональных показателей тракторов, в том числе с учетом изменения их размерно-массовых параметров при укомплектовании балластными грузами, сельскохозяйственными орудиями, сдвоенными шинами и т. д. Для производства расчетов достаточно знать вес трактора, вес балластных грузов (навешиваемых орудий), типоразмер установленных шин, их статический радиус и величину внутришинного давления. Методика позволит существенно улучшить качество прогнозной оценки уровня воздействия на почву как серийно выпускаемой, так и проектируемой тракторной техники.

Ключевые слова: сельскохозяйственный трактор, колесный движитель, вертикальная нагрузка, пятно контакта, алгоритм, расчет

Благодарности: работа выполнена при поддержке Министерства сельского хозяйства России в рамках Государственного задания ФГБНУ «Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса» (тема № 082-00204-23-00).

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Ревенко В. Ю., Назаров А. Н., Скорляков В. И. Методика расчета давления на почву колесных тракторов. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2023;24(5):868-876. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.5.868-876>

Поступила: 28.04.2023

Принята к публикации: 05.09.2023

Опубликована онлайн: 30.10.2023

Method of calculating the pressure on the soil of wheeled tractors

© 2023. Valery Yu. Revenko ✉, Andrej N. Nazarov, Victor I. Skorlyakov

Russian Research Institute of Information and Feasibility Study on Engineering Support of Agribusiness, Pravdinsky, Moscow Region, Russian Federation

The market of tractors in Russia has changed greatly in recent years. A number of new suppliers have appeared on the market, abandoned brands are replaced for Russian analogues and machines from friendly countries. It is hard to evaluate all the quantitative and qualitative diversity of tractors provided to agricultural producers through the system of machine tests, especially considering that every manufacturer has a large number of standard size ranges of power equipment. Nevertheless, the customer should have access to information about the basic consumer properties and the degree of effectiveness of a particular machine unit. The article provides a computational method for evaluating one of the most important functional indicators of tractors, namely, the level of impact of its wheels on the soil, using limited initial information: technical characteristics and operational documentation of the manufacturer. The algorithm given in the text was approved during testing real tractor samples. Insignificant differences in the assessment of the maximum pressure on the soil, obtained as a result of measurements

and calculations (the difference is 1.9-3.3 %) indicate a high degree of reliability of the developed methodology, as well as the possibility of its application in engineering practice to evaluate the functional indicators of tractors, including taking into account changes in their size and mass parameters when equipped with ballast weights, agricultural machines, implements, dual tires, etc. To make calculations, it is enough to know the weight of the tractor, the weight of ballast loads (mounted implements), the size of the installed tires, their static radius and the amount of tire inflation pressure. The methodology will significantly improve the quality of the predictive assessment of the level of impact on the soil of both mass-produced and designed tractor equipment.

Key words: *agricultural tractor, wheel propeller, vertical load, contact patch, algorithm, calculation*

Acknowledgments: the research was carried out under the support of the Ministry of Agriculture of Russia within the state assignment Russian Research Institute of Information and Technical and Economic Studies on Engineering and Technical Provision of Agro-Industrial Complex (theme No. 082-00204-23-00).

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: Revenko V. Yu., Nazarov A. N., Skorlyakov V. I. Methodology for calculating the pressure on the soil of wheeled tractors. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2023;24(5):868-876. (In Russ.). <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.5.868-876>

Received: 28.04.2023

Accepted for publication: 05.09.2023

Published online: 30.10.2023

Оценить эффективность того или иного образца сельскохозяйственной техники конечный потребитель может на основании находящихся в открытом доступе данных, полученных по результатам испытаний, а также характеристик, указанных производителем техники в технической и эксплуатационной документации. В Российской Федерации Министерством сельского хозяйства организованы работы по определению функциональных характеристик (потребительских свойств) и эффективности сельскохозяйственной техники и оборудования. Основной исполнитель – система машиноиспытательных станций (МИС), находящихся в различных природно-климатических зонах страны¹.

К функциональным характеристикам относятся тягово-скоростные, агротехнические и прочие показатели, в том числе величина номинального тягового усилия, буксования, удельного расхода топлива, максимального давления движителей на почву². Последний показатель является одним из важнейших, особенно с экологической точки зрения. В течение последних пяти десятилетий в почве фиксируется значительное увеличение механических напряжений, возникающих от действия ходовых систем техники. В результате подавляющее большинство полей

уплотнено до критических для выращивания сельскохозяйственных культур уровней [1, 2, 3].

Для оценки степени воздействия техники на почву сотрудникам МИС необходимо произвести измерение статической нагрузки, приходящейся на каждый колесный движитель. Затем установить размер площади контакта шины каждого колесного движителя на твердом основании с последующим приведением данного показателя к условиям работы на почвенном основании в соответствии с ГОСТ Р 58656-2019³. Следующим этапом рассчитывается максимальное давление колесных движителей на почву. Таким образом, при определении уровня воздействия техники на почву преобладают натурные измерения и в меньшей мере применяются расчетные методы.

Однако на МИС испытывается всего лишь небольшая часть техники, особенно тракторной, при том, что российский рынок сельскохозяйственной техники в последние годы переживает самую масштабную трансформацию в новейшей истории⁴. На рынке появилось множество новых неизвестных никому поставщиков, происходит ускоренная замена ушедших брендов на российские аналоги и энергосредства из дружественных стран. Естественно, оценить всё это разнообразие техники через систему машиноиспытаний весьма проблематично.

¹Положение об организации работ по определению функциональных характеристик (потребительских свойств) и эффективности сельскохозяйственной техники и оборудования (утв. постановлением Правительства РФ от 1 августа 2016 г. № 740). [Электронный ресурс]. URL: <http://government.ru/docs/all/107846/> (дата обращения: 14.02.2023).

²Нормативные затраты для определения функциональных характеристик сельскохозяйственной техники: брошюра. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2022. 308 с. URL: <https://rosinformagrotech.ru/data/send/1-root/1610-normativnye-zatraty-dlya-opredeleniya-funktsionalnykh-kharakteristik-selskokhozyajstvennoj-tehniki-broshyura>

³ГОСТ Р 58656-2019. Техника сельскохозяйственная мобильная. Методы определения воздействия движителей на почву. М.: Стандартинформ, 2019. 24 с. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data/724/72400.pdf>

⁴АСХОД: что ждет российский рынок сельхозтехники в 2023 году. Агробизнес. 2022;(7). [Электронный ресурс]. URL: <https://agbz.ru/news/askhod-chto-zhdet-rossiyskiy-rynok-selkhoztehniki-v-2023-godu/> (Дата обращения: 02.04.2023).

Цель исследования – разработать расчетный метод оценки одного из важнейших функциональных показателей тракторной техники – уровня воздействия её движителей на почву, в том числе с учетом изменения размерно-массовых параметров агрегата при навешивании на энергосредство балластных грузов и орудий

Научная новизна – определение нового алгоритма оценки максимального давления тракторов на почву расчетным методом, позволяющим учитывать дополнительные воздействия от комплектации навесными адаптерами и балластными грузами.

Материал и методы. Объектом исследований является уровень максимального давления на почву ходовых систем колесных тракторов сельскохозяйственного назначения. Данный показатель зависит от вертикальной нагрузки на колесо, внутришинного давления, размеров шины и прочих параметров, которые напрямую определяют величину контурной площади контакта протектора и соответственно показатели удельного давления.

Авторами предлагается методика расчета, позволяющая оценить уровень воздействия на почву ходовых систем колесной техники с использованием ограниченной исходной информации, например, только на основании данных из технической и эксплуатационной документации завода-изготовителя. В основу методики легли результаты предыдущих исследований [4, 5].

Алгоритм расчета включает в себя следующие этапы: оценку распределения веса по осям трактора без балластных грузов; вычисление центра тяжести трактора в данной комплектации; определение реакций опор под движителями трактора, загруженного балластными грузами или навешенным орудием (сельхозмашиной); расчет контурной площади контакта каждого из движителей с почвой, с последующим определением их среднего и максимального давления на почву.

Оценку релевантности предлагаемой методики проводили путем сравнения расчетных показателей с результатами измерений, полученными при исследовании натуральных образцов тракторной техники. В рамках статьи

приведены результаты оценки на примере полноприводного колёсного трактора John Deer 8420 тягового класса 4. Данный образец в заводском исполнении был укомплектован колесами с шинами размерности переднего моста 600/70R30, заднего – 710/70R42.

Распределение нагрузок по осям и колесам оценивали с использованием 4-платформенных тензометрических весов CAS RW-10P, с пределом взвешивания каждой платформы – 10 т, допустимой погрешностью измерения ± 20 кг. Полученные результаты перепроверяли на стационарных 60-тонных автомобильных весах РС-60Д24 с весовым индикатором CAS CI-200А и 6 тензодатчиками Zemic НМ-9В, с погрешностью измерения ± 30 кг. Контурную площадь пятна контакта шин с жесткой опорной поверхностью определяли для двух вариантов комплектации трактора: с балластом и без него в соответствии с ГОСТ Р 58656-2019. Процесс измерений показан на рисунке 1.

Для описания алгоритма расчета максимального давления на почву ходовых систем тракторов воспользуемся положениями методики проведения испытаний при определении функциональных характеристик и эффективности сельскохозяйственной техники, утвержденной Минсельхозом РФ⁵. В соответствии с ней искомый параметр определяется при полностью загруженной технике на горизонтальной площадке. Поэтому в общем случае распределение сил, действующих на трактор, и реакции опор должны соответствовать схеме, представленной на рисунке 2.

В соответствии со схемой на трактор будут действовать следующие силы и моменты: $G_{тр}$ – вес трактора, кН; $G_{п}$ – вес переднего балластного груза, кН; $G_{з}$ – вес заднего балластного груза или сельхозорудия, кН; $R_{п}$ – реакция опорной поверхности под передней осью, кН; $R_{з}$ – реакция опорной поверхности под задней осью, кН. Кроме вышеперечисленных, на схеме приведены: L – колесная база трактора, м; x – абсцисса центра тяжести трактора относительно задней оси, м; $l_{п}$ – плечо приложения веса переднего балласта (расстояние от передней оси до центра тяжести груза), м; $l_{з}$ – плечо приложения веса заднего балластного груза (или орудия), м.

⁵URL: <http://government.ru/docs/all/107846/>



Рис. 1. Определение размеров контактирующей поверхности шин (а, б), процесс взвешивания трактора (в, г) /

Fig. 1. Determining the dimensions of the tire contact surface (a, b), the tractor weighing process (c, d)

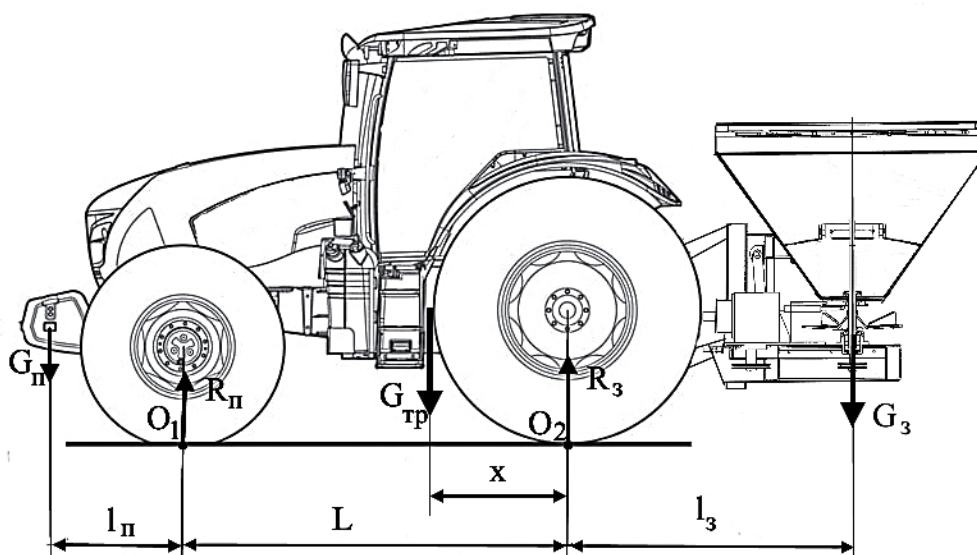


Рис. 2. Схема сил и реакций, действующих в продольной плоскости на трактор при определении максимального давления на почву /

Fig. 2. Diagram of forces and reactions acting in the longitudinal plane on the tractor when determining the maximum pressure on the soil

Горизонтальную координату центра тяжести трактора без балластных грузов определяли по формуле, регламентированной действующим стандартом⁶:

$$x = \frac{R_n \cdot L}{G_{тр}}. \quad (1)$$

В случае навешивания на трактор сельскохозяйственной машины или орудия, а также установки передних балластных грузов реакцию опоры R_3 , вызванной весовой нагрузкой на заднюю ось трактора, вычисляем, предварительно составив уравнение моментов сил относительно точки O_1 (рис. 2):

$$R_3 = \frac{1}{L} (G_{тр} \cdot (L - x) + G_3 \cdot (L + l_3) - G_n \cdot l_n). \quad (2)$$

Соответственно реакцию опоры под передним мостом R_n определяем из уравнения моментов сил относительно точки O_2 :

$$R_n = \frac{1}{L} (G_{тр} \cdot x + G_n \cdot (l_n + L) - G_3 \cdot l_3). \quad (3)$$

Отметим, что в случае навешивания балластных грузов непосредственно на колеса, или использования сдвоенных шин, реакции опор вычисляли путем суммирования веса груза с R_3 и R_n .

Зная осевые нагрузки, а также допуская, что между левым и правым колесом они распределены поровну простым делением R_n и R_3 на 2, рассчитаем реакцию опоры под единственным колесным движителем – m_{ki} .

Контурная площадь пятна контакта колес с жестким опорным основанием может быть определена по представленным в различных источниках информации алгоритмам, разработанным отечественными исследователями [6, 7, 8, 9]. Известны также и аналогичные зарубежные экспериментально-аналитические модели [10, 11]. Однако мы рекомендуем определять искомый параметр с использованием одной из наиболее простых и достоверных формул, приведенных в [12]. Указанная формула наиболее точно описывает площадь контакта для регламентируемого заводом-изготовителем максимально допустимого значения вертикальной нагрузки на колесо $G_{ki}^{регл}$ (кН) при соответствующем внутришинном давлении воздуха $P_{wi}^{регл}$ (кПа). В этом случае контурную площадь пятна контакта шины i -го колеса $F_{ki}^{регл}$ (м²) можно рассчитать, используя следующую зависимость:

$$F_{ki}^{регл} = B_i \cdot \sqrt{f_i \cdot (D_i - f_i)} + 0,5 \cdot f_i \cdot H_i, \quad (4)$$

где B_i и H_i – соответственно ширина и высота профиля i -й шины; m ; D_i – свободный диаметр, m ; f_i – нормальный прогиб, m .

Высоту профиля i -ой шины H_i (м) находим из выражения:

$$H_{ij} = 0,5 \cdot (D_i - d_i), \quad (5)$$

где $d_i = d_i^{inch} \cdot 0,0254$ – диаметр обода в метрах; d_i^{inch} – диаметр обода шины в дюймах, величину которого можно взять из ее маркировки.

Нормальный прогиб шины f_i (м), регламентируемый производителем при максимально допустимой вертикальной нагрузке на шину определяем:

$$f_i = \frac{D_i}{2} - R_{cti}, \quad (6)$$

где R_{cti} – условный статический радиус шины (м), обычно указываемый в каталогах производителями шин.

Чаще всего фактическое давление воздуха в шине $P_{wi}^{факт}$ отлично от регламентируемого $P_{wi}^{регл}$, а фактическая вертикальная нагрузка $G_{ki}^{факт}$ меньше максимально допустимой – $G_{ki}^{регл}$. В этом случае необходимо уточнить контурную площадь пятна контакта с использованием следующей математической модели:

$$F_{ki}^{факт} = F_{ki}^{регл} \cdot \frac{(P_{wi}^{регл})^{0,25}}{(G_{ki}^{регл})^{0,5}} \cdot \frac{(G_{ki}^{факт})^{0,5}}{(P_{wi}^{факт})^{0,25}}. \quad (7)$$

Площадь контакта шины i -го колеса с почвой F_{kpi} находим по выражению:

$$F_{kpi} = F_{ki}^{факт} \cdot k_{1i}, \quad (8)$$

где значения k_{1i} для колес передней и задней осей зависят от диаметра колес и берутся из ГОСТ Р 58656-2019.

Среднее нормальное давление колесного движителя на почву $\bar{q}_{kij}$, кПа:

$$\bar{q}_{ki} = \frac{m_{ki} \cdot g}{10^3 \cdot F_{kpi}}, \quad (9)$$

где m_{ki} – масса, создающая статическую нагрузку на почву единичным колесным движителем, кг; g – ускорение свободного падения, 9,81 м/с².

Максимальное нормальное давление i -го колесного движителя на почву q_{maxi}^k определяли:

$$q_{maxi}^k = \bar{q}_{ki} \cdot k_2, \quad (10)$$

где $k_2 = 1,5$ – коэффициент продольной неравномерности распределения давления по площади контакта шины.

⁶ГОСТ 33691-2015 Испытания сельскохозяйственной техники. Метод определения угла поперечной статической устойчивости М.: Стандартинформ, 2016. 9 с.

URL <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293753/4293753892.pdf?ysclid=llrtntx661705843>

Таким образом, имея в наличии показатели эксплуатационной массы трактора, а еще лучше – развесовки по осям или колесам, можно с помощью предлагаемого алгоритма рассчитать максимальное давление на почву конкретного образца тракторной техники. В том числе, при её балластировке передними и задними балластными грузами, а также при агрегатировании с различными видами сельскохозяйственных машин и орудий. В случае отсутствия таких данных (например, если нам

известна только масса машины [13]), можно воспользоваться осредненными результатами оценки соотношения доли массы, приходящейся на переднюю ось тракторов с колесной формулой⁷, рекомендуемой различными исследователями⁸ (табл. 1).

Результаты и их обсуждение. Результаты инструментальной оценки размерно-массовых параметров трактора John Deer 8420 с балластными грузами и без них приведены в таблице 2.

Таблица 1 – Примерные соотношения доли передней и задней осей в общей массе колесного трактора при различных вариантах агрегатирования /

Table 1 – Approximate ratios of the share of the front and rear axles in the total weight of a wheeled tractor with various aggregation options

Тип трактора / Tractor type	Орудие / Implement		
	прицепное / trailed	полунавесное / semi mounted	полностью навесное / fully mounted
4к2 / 4к4	25/75	30/70	35/55
4к4а / 4к4а	35/65	35/65	40/60
4к4б / 4к4б	55/45	55/45	60/40

Таблица 2 – Показатели трактора John Deer 8420 /

Table 2 – Indicators of the John Deer 8420 tractor

Показатель / Indicator	Значение / Meaning
Масса трактора без балласта, кг / Tractor weight without ballast, kg	10090
Масса, приходящаяся на переднюю ось, кг / Weight per front axle, kg	4380
Масса, приходящаяся на заднюю ось, кг / Weight per rear axle, kg	5710
Колесная база, мм / Wheel base, mm	3020
Масса трактора с балластом, кг / Tractor weight with ballast, kg	12340
Масса переднего балластного груза, кг / Weight of the front ballast, kg	1250
Плечо приложения веса переднего балласта, мм / Shoulder of application of the weight of the front ballast, mm	1560
Вес заднего балластного груза, кг / Weight of the rear ballast, kg	1250
Плечо приложения веса заднего груза, м / Shoulder of the application of the weight of the rear load, m	0
Реакция опорной поверхности под передней осью, кг / Reaction of the support surface under the front axle, kg	5840
Реакция опорной поверхности под задней осью, кг / Reaction of the support surface under the rear axle, kg	6500

Результаты измерений размерных параметров шин передней и задней осей трактора John Deer 8420 сведены в таблицу 3.

Используя приведенный в предыдущем разделе алгоритм расчета и данные таблиц 2 и 3, вычислим величину максимального давле-

ния на почву движителей исследуемого образца техники. Полученные показатели, а также результаты взвешиваний трактора и измерений контурной площади пятна контакта шин 710/70R42 и 600/70R30 сведены в таблицу 4.

⁷Hanna H. M., Harmon J. D., Petersen D. Farm Energy: Ballasting tractors for fuel efficiency. 2010.

URL: <https://dr.lib.iastate.edu/entities/publication/fa237a35-c8a0-4673-917c-e98d135d0957>

⁸ Tractor ballasting Identify the goal-weight distribution by axle. Agriculture and Environment Extension Publications. Book 29. 2021. [Электронный ресурс] URL: https://www.dpi.nsw.gov.au/data/assets/pdf_file/0010/1315297/primefact-tractor-ballasting.pdf (дата обращения: 05.04.2023).

Таблица 3 – Характеристики колесных движителей трактора John Deer 8420 /
Table 3 – Characteristics of John Deere 8420 tractor wheel propellers

Показатель / Indicator	Шина 710/70R42 / Tire 710/70R42	Шина 600/70R30 Tire 600/70R30
Свободный диаметр шины, мм / Free tire diameter, mm	1992	1596
Ширина профиля шины, мм / Tire profile width, mm	744	610
Высота профиля шины, мм / Tire profile height, mm	495	416
Статический радиус, мм / Static radius, mm	900	711
Нормальный прогиб, мм / Normal deflection, mm	96	87
Диаметр обода шины, мм / Tire rim diameter, mm	1070	762
Давление воздуха в шине, кПа / Inflation Pressure, kPa	150	180

Таблица 4 – Расчетные и измеренные показатели трактора John Deer 8420 /
Table 4 – Calculated and measured parameters of the John Deere 8420 tractor

Показатель / Indicator	Измерение / Measurement	Расчет / Calculation
Расстояние от центра тяжести трактора до задней оси, мм / Distance from the tractor's center of gravity to the rear axle, mm	-	1310
Реакция опорной поверхности, кг / Reaction of the support surface, kg		
под передней осью / under the front axle	5830	5890
под задней осью / under the rear axle	6510	6450
Контурная площадь пятна контакта шин, м ² / Contour area of the tire contact patch, m ²		
710/70R42 / 710/70R42	0,350	0,358
600/70R30 / 600/70R30	0,232	0,239
Максимальное давление на почву шины, кПа / Maximum ground pressure of the tire, kPa		
710/70R42 / 710/70R42	124,4	120,4
600/70R30 / 600/70R30	167,9	164,7

Анализируя полученные данные, можно резюмировать, что предложенный алгоритм определения одной из важнейших функциональных характеристик тракторной техники – уровня воздействия её движителей на почву – вполне пригоден для практического использования. При этом с применением алгоритма возможен учет любого изменения размерно-массовых параметров трактора, происходящего при навешивании на него дополнительных балластных грузов, а также при его агрегатировании с навесными адаптерами. Кроме того, разработанная авторами математическая модель для определения контурной площади контакта современных высокоэластичных тракторных шин предусматривает все возможные варианты изменения внешних (вертикальной нагрузки на колесо) и внутренних (давления воздуха в шине) факторов. То есть модель учитывает то противоречивое обстоятельство, что при увеличении внутришинного давления происходит уменьшение площади пятна контакта протек-

тора с опорным основанием, а рост вертикальной нагрузки на колесо, наоборот, приводит к нелинейному увеличению размеров контактирующей поверхности.

Несущественные различия в оценке максимального давления на почву исследуемых образцов колесных движителей, полученные в результате измерений и расчетов (разница по передним колесам составляет 3,3 %, по задним – 1,9 %), свидетельствуют о высокой степени достоверности разработанной методики расчета, а также о возможности её применения в инженерной практике для оценки функциональных показателей тракторной техники, оснащенной как одинарными, так и сдвоенными шинами любых размеров, включая крупногабаритные и низкопрофильные. Для проведения расчетов достаточно знать вес трактора, вес балластных грузов, типоразмер установленных на нем шин, их статический радиус и величину внутришинного давления. Методика позволит существенно улучшить качество

прогнозной оценки уровня воздействия на почву как серийно выпускаемой тракторной техники, так и проектируемой.

Заключение. Предлагаемый алгоритм расчета позволяет с достаточной для решения практических задач точностью оценить уровень максимального давления на почву ходовых систем колесных тракторов с использованием ограниченной исходной информации, содержащейся в технической характеристике и эксплу-

атационной документации завода-изготовителя. Методика дает возможность оценивать воздействие на почву любого вида колесной техники (даже при отсутствии экспериментальных оценок), причем как существующей, так и вновь разрабатываемой. Её использование будет способствовать выбору наиболее эффективных образцов тракторов для почвосберегающих технологий возделывания сельскохозяйственных культур.

Список литературы

1. Sivarajan S., Maharlooei M., Bajwa S. G., Nowatzki J. Impact of soil compaction due to wheel traffic on corn and soybean growth, development and yield. Soil and Tillage Research. 2018;175:234-243. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.09.001>
2. Damme L., Stettler M., Pine F., Vervaeke P., Keller T., Munkholm L., Lamandé M. The contribution of tyre evolution to the reduction of soil compaction risks. Soil and Tillage Research. 2019;194:104283. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.05.029>
3. Keller T., Sandin M., Colomba T., Horn R., Or D. Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. Soil and Tillage Research. 2019;194:104293. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104293>
4. Скорляков В. И., Ревенко В. Ю. Совершенствование метода расчета давления движителей зерноуборочных комбайнов на почву. Тракторы и сельхозмашины. 2022;89(6):403-410. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-108481> EDN: KGFAFK
5. Ревенко В. Ю., Скорляков В. И., Иванов А. Б. Площадь контакта шины с опорой как функция вертикальной нагрузки и внутришинного давления. Наука в центральной России. 2022;(4(58)):74-83. DOI: <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2022-4-74-83> EDN: DFALBX
6. Артемов А. В., Гончаренко С. В., Прядкин В. И. Определение пятна контакта шин сверхнизкого давления 1020x420-18 Бел-79 для лесной техники малого класса. Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2020;81(48):250-256. DOI: <https://doi.org/10.34220/2308-8877-2020-8-1-250-256> EDN: IHXWNE
7. Годжаев З. А., Гончаренко С. В., Артемов А. В. Расчетно-экспериментальная оценка воздействия на почву шин сверхнизкого давления мобильных энергосредств. Тракторы и сельхозмашины. 2020;(3):35-47. DOI: <https://doi.org/10.31992/0321-4443-2020-3-35-47> EDN: CRBLBG
8. Липкань А. В., Панасюк А. Н., Кашбулгаев Р. А. Обоснование выбора способа определения параметров пятна контакта пневмоколесного движителя с опорным основанием. Бюллетень науки и практики. 2019;5(6):212-228. DOI: <https://doi.org/10.33619/2414-2948/43/27> EDN: RWSULA
9. Липкань А. В., Панасюк А. Н., Годжаев З. А., Лавров А. В. Оценка способов экспериментально-аналитического определения контурной площади пятна контакта пневмашины с опорным основанием. Тракторы и сельхозмашины. 2021;88(1):40-50. DOI: <https://doi.org/10.31992/0321-4443-2021-1-40-50> EDN: MKPHZH
10. Farhadi P., Golmohammadi A., Sharifi A., Shahgholi G. Prediction of the tractor tire contact area, contact volume and rolling resistance using regression model and artificial neural network. Agricultural Engineering International: CIGR Journal. 2019;21(3):26-38. URL: <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/5438>
11. Schjøning P., Stettler M., Keller T., Lassen P., Lamandé M. Predicted tyre-soil interface area and vertical stress distribution based on loading characteristics. Soil and Tillage Res. 2015;152:52-66. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.03.002>
12. Ревенко В. Ю., Фролов С. С., Ткаченко А. Н., Иванов А. Б. Уточненная методика определения площади опорной поверхности шин современной сельскохозяйственной техники. Техника и оборудование для села. 2021;(7(289)):10-15. DOI: <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2021-7-10-15> EDN: KTXFUP
13. Polcar A., Renčín L., Votava J. Drawbar Pull and Its Effect on the Weight Distribution of a Tractor. Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis. 2017;65(1):145-150. DOI: <https://doi.org/10.1118/actaun201765010145>

References

1. Sivarajan S., Maharlooei M., Bajwa S. G., Nowatzki J. Impact of soil compaction due to wheel traffic on corn and soybean growth, development and yield. Soil and Tillage Research. 2018;175:234-243. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.09.001>
2. Damme L., Stettler M., Pine F., Vervaeke P., Keller T., Munkholm L., Lamandé M. The contribution of tyre evolution to the reduction of soil compaction risks. Soil and Tillage Research. 2019;194:104283. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.05.029>
3. Keller T., Sandin M., Colomba T., Horn R., Or D. Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. Soil and Tillage Research. 2019;194:104293. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104293>

4. Skorlyakov V. I., Revenko V. Yu. Improvement of the method of calculation of pressure of combine harvester propulsion on soil. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2022;89(6):403-410. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-108481>
5. Revenko V. Yu., Skorlyakov V. I., Ivanov A. B. Tire and support area as a function of vertical load and tire pressure. *Nauka v tsentral'noy Rossii* = Science in Central Russia. 2022;(4(58)):74-83. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2022-4-74-83>
6. Artemov A. V., Goncharenko S. V., Pryadkin V. I. Determining the contact spot of ultra-low pressure tires 1020x420-18 bel-79 for small-class forestry equipment. *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* = Current directions of scientific research of the XXI century: theory and practice. 2020;81(48):250-256. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34220/2308-8877-2020-8-1-250-256>
7. Godzhaev Z. A., Goncharenko S. V., Artemov A. V. Computational and experimental assessment of the influence of ultra-low pressure tires of mobile power equipment on soil. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2020;(3):35-47. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31992/0321-4443-2020-3-35-47>
8. Lipkan A. V., Panasyuk A. N., Kashbulgayanov R. A. Rationale for selecting a method for determining parameters of the contact spot of pneumatic wheel mover with support base. *Byulleten' nauki i praktiki* = Bulletin of Science and Practice. 2019;5(6):212-228. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.33619/2414-2948/43/27>
9. Lipkan A. V., Panasyuk A. N., Godzhaev Z. A., Lavrov A. V. Evaluation of methods for experimental and analytical determination of the contour area of the contact patch of a pneumatic tire with a support base. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2021;88(1):40-50. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31992/0321-4443-2021-1-40-50>
10. Farhadi P., Golmohammadi A., Sharifi A., Shahgholi G. Prediction of the tractor tire contact area, contact volume and rolling resistance using regression model and artificial neural network. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*. 2019;21(3):26-38. URL: <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/5438>
11. Schjønning P., Stettler M., Keller T., Lassen P., Lamandé M. Predicted tyre-soil interface area and vertical stress distribution based on loading characteristics. *Soil and Tillage Res.* 2015;152:52-66. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.03.002>
12. Revenko V. Yu., Frolov S. S., Tkachenko A. N., Ivanov A. B. Refined method for determining the current agricultural machinery tire wearing surface area. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela* = Machinery and Equipment for Rural Area. 2021;(7(289)):10-15. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2021-7-10-15>
13. Polcar A., Renčín L., Votava J. Drawbar Pull and Its Effect on the Weight Distribution of a Tractor. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*. 2017;65(1):145-150. DOI: <https://doi.org/10.1118/actaun201765010145>

Сведения об авторах

✉ **Ревенко Валерий Юрьевич**, кандидат техн. наук, ученый секретарь Новокубанского филиала ФГБНУ «Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса» (КубНИИТиМ), ул. Красная 15, г. Новокубанск, Новокубанский район, Российская Федерация, 352243, e-mail: director@kubniitim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0336-5323>, e-mail: skskniish@rambler.ru

Назаров Андрей Николаевич, научный сотрудник Новокубанского филиала ФГБНУ «Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса» (КубНИИТиМ), ул. Красная 15, г. Новокубанск, Новокубанский район, Российская Федерация, 352243, e-mail: director@kubniitim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0238-3717>

Скорляков Виктор Иосифович, кандидат техн. наук, ведущий научный сотрудник Новокубанского филиала ФГБНУ «Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса» (КубНИИТиМ), ул. Красная 15, г. Новокубанск, Новокубанский район, Российская Федерация, 352243, e-mail: director@kubniitim.ru

Information about the authors

✉ **Valery Yu. Revenko**, PhD in Engineering, Scientific secretary of the Novokubansk branch of the Russian Research Institute of Information and Feasibility Study on Engineering Support of Agribusiness, Krasnaya str. 15, Novokubansk, Novokubansky district, 352243, e-mail: director@kubniitim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0336-5323>, e-mail: skskniish@rambler.ru

Andrej N. Nazarov, Researcher, the Novokubansk branch of the Russian Research Institute of Information and Feasibility Study on Engineering Support of Agribusiness, Krasnaya str. 15, Novokubansk, Novokubansky district, 352243, e-mail: director@kubniitim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0238-3717>

Victor I. Skorlyakov, PhD in Engineering, leading researcher, the Novokubansk branch of the Russian Research Institute of Information and Feasibility Study on Engineering Support of Agribusiness, Krasnaya str. 15, Novokubansk, Novokubansky district, 352243, e-mail: director@kubniitim.ru

✉ – Для контактов / Corresponding author

Исследование пружинного механизма подвеса сошника дернинной сеялки

© 2023. В. А. Сысуев, С. А. Дёмшин[✉], С. В. Гайдидей, Д. А. Зырянов
ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока
имени Н. В. Рудницкого», г. Киров, Российская Федерация

Одной из перспективных технологий восстановления деградированных кормовых угодий, соответствующих требованиям органического земледелия, является прямой полосной посев семян трав в дернину с механической обработкой полос почвы, ширина которых обеспечивает успешное развитие всходов без использования гербицидов. Для повышения качества высева дернинных сеялок предложена модернизированная конструкция сошниковой группы с креплением сошника килевидного типа на параллелограммном механизме подвеса в виде пружин кручения, отличающаяся их вертикальным размещением на раме сеялки (патент РФ №2772128). Для изучения влияния конструктивных и технологических параметров сошниковой группы на базе пружинного механизма подвеса на время возвращения механической системы в состояние динамического равновесия разработана лабораторная установка, включающая комплект измерительно-регистрирующей аппаратуры на базе многофункционального датчика WitMotion WT901WIFI MPU9250. В процессе исследований реализован план эксперимента Бокса-Бенкина второго порядка для трёх факторов, который позволил определить зависимость времени затухания колебаний механизма подвеса сошниковой группы от следующих параметров системы: глубины бороздообразования, длины поводков механизма подвеса и массы сошника килевидного типа. Для выбранных геометрических параметров экспериментального образца сошниковой группы и установленной эквивалентной жёсткости пружин кручения, равной 240 Н·м/рад, диапазон минимальных значений времени переходного периода находится в пределах 0,212...0,218 с и соответствует глубине бороздообразования 41,3...50,0 мм, длине поводков 0,13 м, массе сошника 1,7...1,8 кг. Траектория сошника в ходе переходного процесса в большинстве опытов соответствует затухающему колебательному движению, в ряде случаев представляет предельно аperiodическое движение.

Ключевые слова: прямой посев в дернину, фрезерный бороздовскрыватель, сошниковая группа, пружина кручения, сошник килевидный

Благодарности: работа выполнена в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого» (тема № FNWE-2022-0002).

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Сысуев В. А., Дёмшин С. Л., Гайдидей С. В., Зырянов Д. А. Исследование пружинного механизма подвеса сошника дернинной сеялки. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2023;24(5):877-886.

DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.5.877-886>

Поступила: 20.06.2023

Принята к публикации: 11.10.2023

Опубликована онлайн: 30.10.2023

Study of the spring suspension mechanism of the coulter of the sod seeder

© 2023. Vasiliy A. Sysuev, Sergey L. Demshin[✉], Sergey V. Gaididei, Dmitry A. Zyryanov

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

One of the promising technologies for restoring degraded forage lands that meets the requirements of organic farming is direct strip sowing of grass seeds into the sod with mechanical cultivation of strips of soil, the width of which ensures the successful development of seedlings without the use of herbicides. To improve the quality of seeding of sod seeders, a modernized design of the coulter group has been proposed with a shoe opener mounted on a parallelogram suspension mechanism in the form of torsion springs, characterized by their vertical placement on the seeder frame (RF patent No. 2772128). To study the influence of the design and technological parameters of the coulter group based on the spring suspension mechanism on the time the mechanical system returns to the condition of dynamic balance, a laboratory installation was developed. It includes a set of measuring and recording equipment based on the multifunctional sensor WitMotion WT901WIFI MPU9250. In the process of the research, a second-order Box-Benkin experiment plan for three factors was implemented, which made it possible to determine the dependence of the damping time of oscillations of the suspension mechanism of the coulter group on the following system parameters: depth of furrow formation, length of the leashes of the suspension mechanism and mass of the shoe opener. For the selected geometrical parameters of the experimental sample of the coulter group and the established equivalent stiffness of the torsion springs, equal to 240 N·m/rad, the range of minimum values of the transition period time is within 0.212...0.218 s and corresponds to the furrow formation depth 41.3...50.0 mm, the length of the leashes 0.13 m, the weight of the coulter 1.7...1.8 kg. The trajectory of the shoe opener during the transition process in most experiments corresponds to a damped oscillatory motion, in some cases represents an extremely aperiodic motion.

Keywords: direct sowing in the sod, disc milling cutter, coulter group, torsion spring, shoe opener

Acknowledgements: The research was carried out within the state assignment of the Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky (theme No. FNWE-2022-0002).

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: Sysuev V. A., Demshin S. L., Gaididei S. V., Zyryanov D. A. Study of the spring suspension mechanism of the coulter of the sod seeder. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2023;24(5):877-886. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.5.877-886>

Received: 20.06.2023

Accepted for publication: 11.10.2023

Published online: 30.10.2023

Для развития органического земледелия на Евро-Северо-Востоке России в секторе производства продукции животноводства необходимо решить проблему обеспечения экологически чистыми кормами полноценного рациона животных^{1, 2} [1]. Регион обладает обширными площадями залежных земель и неиспользуемых естественных лугов и пастбищ, которые могут быть введены в производственный оборот, но на практике отсутствуют эффективные технологии восстановления деградированных кормовых угодий, удовлетворяющие экологическим требованиям. Наиболее перспективной из них является агротехника, базирующаяся на прямом полосном посеве семян трав в дернину с механическим разрушением полосы дернины шириной не менее, чем необходимо для успешного прорастания семян и развития всходов без использования гербицидов для подавления ценотических связей и снижения конкуренции за факторы среды в ценозе [2, 3, 4]. При правильном применении прямой полосной посев обладает высокой эффективностью при минимальных капитальных вложениях, значительно снижает затраты энергии, посевного материала, рабочего времени, а также экологически безопасен [5, 6]. Для осуществления технологии разработано семейство дернинных сеялок с дисковыми фрезами в качестве бороздовскрывателей сошниковых групп³ [7, 8]. В то же время данный метод восстановления продуктивности кормовых угодий разработан для лугов и пастбищ, поддерживаемых в продуктивном состоянии, поэтому его агротехнические требования должны быть адаптированы к условиям деградированных кормовых угодий, как и конструкция дернинных сеялок. Одним из направлений модернизации сеялок должно стать повышение надежности технологического процесса высева

и заделки семян в почву посредством разработки компактной сошниковой группы, позволяющей отказаться от высева семян и туков под кожух фрезерного бороздовскрывателя.

Цель исследования – определение основных конструктивно-технологических параметров сошниковой группы дернинной сеялки с механизмом подвеса на базе пружин кручения.

Новизна работы – получена модель регрессии функционирования сошниковой группы дернинной сеялки с креплением сошника килевидного типа на параллелограммном механизме подвеса в виде пружин кручения, отличающаяся их вертикальным размещением на раме сеялки (патент РФ №2772128) [9], позволяющая на стадии проектирования определить основные конструкторско-технологические параметры её пружинного механизма подвеса.

Материал и методы. Сравнительные исследования разных способов высева семян трав и минеральных удобрений при осуществлении прямого посева семян трав в дернину сеялкой с фрезерными бороздовскрывателями, выполненные в 2016-2022 годах лабораторией механизации ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого», подтвердили перспективность выноса семя- и тукозаделывающих рабочих органов из-под защитного кожуха дисковых фрез. В ходе ранее проведенных исследований достаточно высокую эффективность функционирования показала сошниковая группа с механизмом подвеса сошника килевидного типа на поводках пружины кручения [9, 10, 11].

Первый вариант конструкции пружинного механизма подвеса сошниковой группы включал верхнее звено, функцию которого выполнял брус крепления прикатывающего катка, и нижнее звено, на котором установлены

¹Кант Г. Биологическое растениеводство: возможности биологических агросистем. Пер. с нем. С. О. Эбель. М.: Агропромиздат, 1988. 207 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001430017>

²Прогноз научно-технологического развития отрасли растениеводства, включая семеноводство и органическое земледелие России, в период до 2030 года. Папцов А. Г., Алтухов А. И., Кашеваров Н. И., Першукевич П. М., Денисов А. С., Рудой Е. В. [и др.]. Новосибирск: изд-во НГАУ «Золотой колос», 2019. 100 с. URL: <https://nsau.edu.ru/file/757891?get=a70a565f4138c62b15cedaa38529cfac2>

³Рекомендации по улучшению лугов и пастбищ в Северо-Восточном регионе Европейской части России. М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2007. 116 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01003383003>

сошники килевидного типа для туков и семян, а также вертикальные звенья, выполненные в виде прицепов пружин кручения. Размещение сошниковой группы дернинной сеялки между кожухом фрезерного бороздовскрывателя и прикатывающим катком предъявляет повышенные требования к компактности её конструкции, что послужило поводом модернизации её схемы, заключающейся в креплении тукосеменного сошника килевидного типа на механизме подвеса с вертикальным расположением пружин кручения (патент РФ №2772128) [12]. Механизм крепления сошников выполнен в виде подвеса параллелограммного типа, включаю-

щей два параллельных звена в виде прицепов пружин кручения (рис. 1). Половина шарниров механизма подвеса замещена пружинами кручения, вторая часть шарниров этих звеньев закреплена на прицепах пружин кручения. Звено, соединяющее шарниры, одновременно является кронштейном крепления сошника килевидного типа. Предварительное усилие заглабления сошника задается посредством поджатия пружин кручения подвеса, величина сжатия которых определяется положением ограничительного бруса, имеющего возможность перемещения в поперечно-вертикальной плоскости.

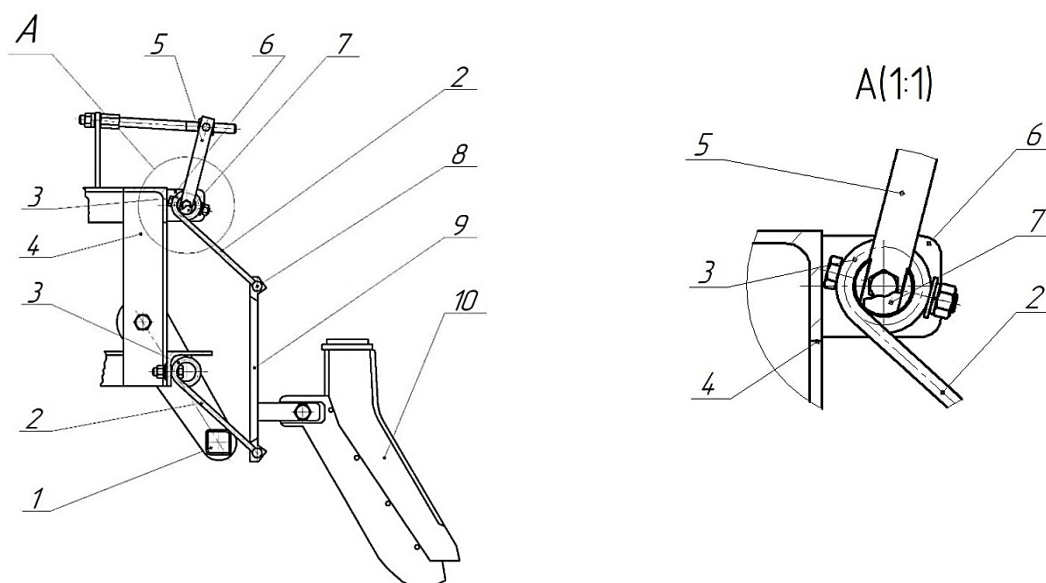


Рис. 1. Общий вид пружинного механизма подвеса килевидного сошника дернинной сеялки (вид сбоку): 1 – брус ограничительный; 2 – прицеп пружины; 3 – пружина кручения; 4 – рама сеялки; 5 – механизм регулирования угла поворота оси; 6 – опора; 7 – ось крепления; 8 – шарнир; 9 – звено механизма подвеса; 10 – сошник килевидный /

Fig. 1. General view of the spring mechanism for suspension of the shoe opener of the sod seeder (side view): 1 - restrictive beam; 2 - spring trailer; 3 - torsion spring; 4 - seeder frame; 5 - mechanism for adjusting the angle of rotation of the axis; 6 - bearing support; 7 - fastening axis; 8 - hinge; 9 - link of the suspension mechanism; 10 - shoe opener

Грубая регулировка глубины хода сошника выполняется путем изменения положения опорных колес сеялки, для того чтобы суммарное усилие пружин кручения соответствовало силе сопротивления почвы в процессе движения сошника при заданной глубине посева. Точная настройка усилия заглабления механизма подвеса сошниковой группы обеспечивается за счёт установки части пружин кручения на оси, имеющей возможность вращения и фиксации выбранного угла положения пружин кручения.

Применение пружинного механизма подвеса сошниковой группы позволяет сеялке устойчиво поддерживать заданную глубину посева за счет достаточно точного копирования микрорельефа поверхности. Тяговое сопротив-

ление сошника напрямую зависит от глубины его погружения в почву при бороздообразовании и любое изменение величины заглабления обуславливает противоположную реакцию пружин кручения, направленную на компенсацию колебаний тягового усилия посредством поддержания заданной глубины бороздообразования.

Совместное использование в механизме подвеса пружин кручения, жёстко закрепленных на раме, и пружин кручения, жёстко установленных на подвижной оси, усилие которых можно регулировать относительно равновесного положения в диапазоне от отрицательных до положительных значений за счёт изменения угла поворота оси, позволяет точно настраивать величину усилия заглабления сошника, необходимую

для преодоления сопротивления почвы, соответствующего заданной глубине хода сошника.

Предложенная конструкция пружинного подвеса сошниковой группы повысит равномерность глубины бороздообразования и посева, снизит трудоёмкость настройки высевальных органов сеялок при сохранении компактности его конструкции.

Для определения рациональных параметров сошниковой группы на базе параллелограммного механизма подвеса с поводками в виде пружин кручения проведены экспериментальные исследования, в процессе которых изучалось влияние длины поводков l пружины кручения, глубины погружения h наральника

сошника в почву (бороздообразования) и массы m сошника на время t затухания колебаний механизма подвеса.

Для проведения опытов разработана лабораторная установка (рис. 2, а, б), представляющая собой раму, на которой установлены подшипниковые узлы с осями крепления пружин кручения. Звено механизма подвеса с кронштейном крепления сошника шарнирно закреплено на поводках пружин кручения. Механизм регулировки позволяет изменять угол наклона поводков пружин кручения, а также полностью «отключать» одну из пружин кручения, т. е. пружина свободно вращается вместе с осью в подшипниковых опорах, при этом витки пружины не работают на сжатие или растяжение.

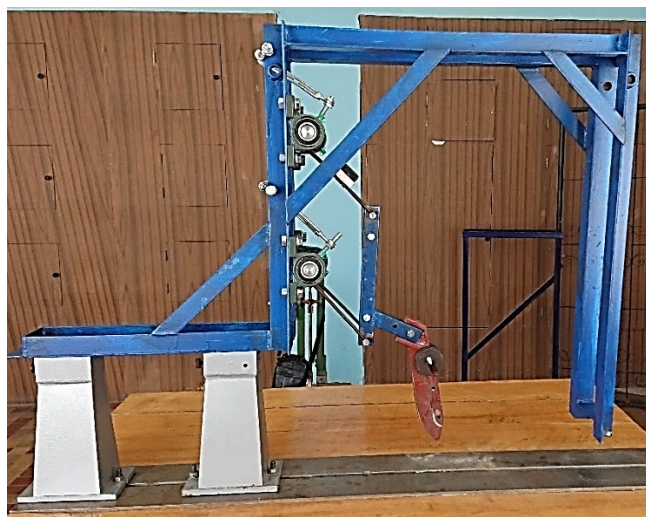
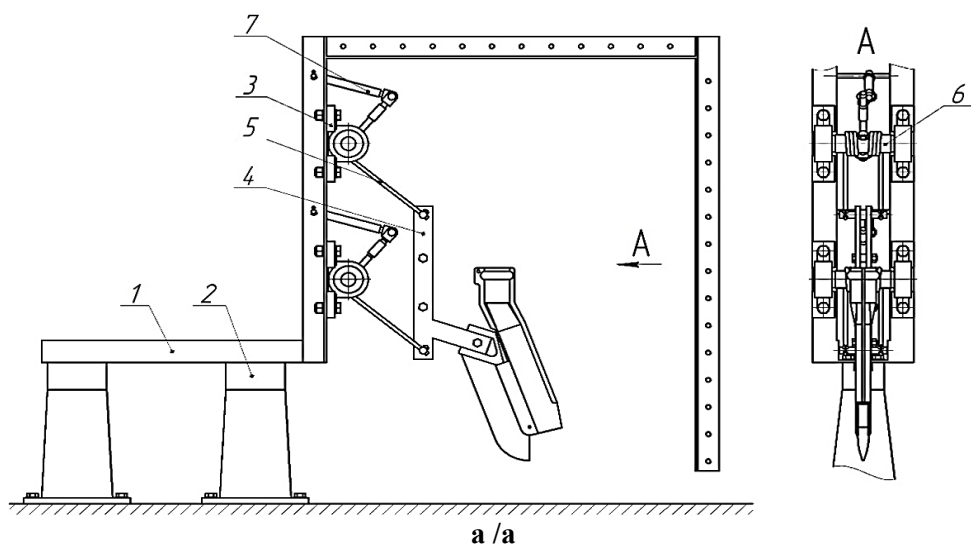


Рис. 2. Лабораторная установка для исследования экспериментального образца сошниковой группы: а, б – общий вид; в – регистрирующий датчик WitMotion WT901WIFI MPU9250: 1 – рама; 2 – стойка рамы; 3 – опора подшипниковая; 4 – звено механизма подвеса с кронштейном крепления; 5 – прицеп пружины кручения; 6 – ось; 7 – механизм регулировки угла поворота оси /

Fig. 2. Laboratory installation for the study of an experimental sample of the coulter group: а, б – general view; в – recording sensor WitMotion WT901WIFI MPU9250: 1 – frame; 2 – frame rack; 3 – bearing support; 4 – a link of the suspension mechanism with a mounting bracket; 5 – torsion spring leash; 6 – axis; 7 – mechanism for adjusting the angle of rotation of the axis

Снятие данных функционирования экспериментального образца сошниковой группы осуществлялось комплектом измерительно-регистрирующей аппаратуры на базе многофункционального датчика WitMotion WT901WIFI MPU9250 (рис. 2, в). Датчик WitMotion WT901 объединяет в себе функции высокоточного гироскопа, акселерометра и датчика геомагнитного поля, позволяет проводить замеры с частотой до 200 измерений в секунду и точностью до $0,05^\circ$, в режиме реального времени положения датчика в 3-осевой системе координат, угловую скорость и ускорение. В разработанной установке назначением датчика является регистрация показателей угловой скорости и угла поворота поводков механизма подвеса сошника относительно оси x с получением массива данных в формате Excel на персональном компьютере⁴.

Конструкция лабораторной установки позволяет изменять длину поводков l посредством перемещения шарнира крепления кронштейна сошника по прицепу пружины. Регу-

лировка жёсткости c пружин кручения проводится путем установки дополнительной пружины растяжения. Необходимое значение массы m сошника достигалось путем установки дополнительных грузов. Настройка по глубине h бороздообразования выполнялась изменением положения ящика с почвой в вертикальной плоскости.

Исходя из результатов теоретических исследований и предварительных экспериментов, определены значимые факторы и диапазоны их варьирования. В ходе исследований реализован трехуровневый план Бокса-Бенкина для трёх факторов. Эксперимент позволил изучить зависимость времени t затухания колебаний механизма подвеса сошниковой группы от следующих факторов: глубины h бороздообразования, мм; длины l поводков механизма подвеса, м; массы m сошника килевидного типа, кг. Обозначение факторов, уровни и интервалы их варьирования приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Обозначение факторов, уровни и интервалы их варьирования /

Table 1 – Designation of factors, levels and intervals of their variation

Фактор / Factor	Код фактора / Code factor	Уровни варьирования фактора / Levels of factor variation			Интервал / Interval
		нижний / lower (-1)	основной / main (0)	верхний / top (+1)	
Глубина бороздообразования, h , мм / Depth of furrow formation, h , mm	x_1	10	30	50	20
Длина поводков, l , м / Length of leashes, l , m	x_2	0,08	0,13	0,18	0,05
Масса сошника, m , кг / Coulter mass, m , kg	x_3	1,4	1,8	2,2	0,4

Первоначальное отклонение поводков сошниковой группы от положения статического равновесия в опыте устанавливали, равным 5° . Эквивалентная жёсткость пружин кручения механизма подвеса в течение эксперимента не изменялась и составляла $c = 240 \text{ Н} \cdot \text{м/рад}$. Опыты проводили в трехкратной повторности, использовали сошник килевидного типа сеялки СО-4,2. Почвенный ящик заполняли просеянным песком, фракция до 3,0 мм. Скорость перемещения ящика составляла 1,0 м/с, что соответствует рабочей скорости дернинных сеялок.

Результаты и их обсуждение. После реализации плана эксперимента полученные результаты обработаны с помощью программ

Microsoft Excel и Statgrafics Plus 5.1, часть из них, в том числе показатели среднего значения времени t , с, (Y) затухания колебаний сошника, а также его дисперсии D , среднеквадратичного отклонения σ , коэффициента вариации v , абсолютной Δt и относительной ошибки ε приведены в таблице 2.

После обработки данных получена модель регрессии, проверенная на адекватность по F -критерию Фишера (вероятность $p = 0,95$):

$$Y = 0,2976 - 0,0947 \cdot x_1 + 0,0665 \cdot x_2 + 0,0528 \cdot x_3 - 0,0308 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,0313 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0,0664 \cdot x_1^2 + 0,0419 \cdot x_2^2. \quad (1)$$

⁴WT901 Attitude Angle Sensor. Specification. [Электронный ресурс]. URL: <https://images-na.ssl-images-amazon.com/images/I/B11fVGszLsS.pdf> (дата обращения: 15.05.2023).

Таблица 2 – Время t (У) уравнивания сошника и его статистические характеристики /
Table 2 – Time t of the coulter balancing and its statistical characteristics

№ опыта / No. of experiment	Время, t , с / Time, t , s				$D \cdot 10^{-4}$, c^2 / s^2	$\sigma \cdot 10^{-2}$, c / s	v , %	Δt , c / s	ε , %
	y_1	y_2	y_3	y_{cp}					
1	0,375	0,345	0,330	0,350	5,25	2,291	6,547	0,0568	16,235
2	0,219	0,218	0,218	0,218	0,33	0,057	0,264	0,0014	0,656
3	0,581	0,525	0,555	0,554	7,85	2,802	5,061	0,0695	12,553
4	0,298	0,301	0,299	0,299	0,23	0,152	0,510	0,0038	1,266
5	0,295	0,301	0,301	0,299	0,12	0,346	1,159	0,0086	2,873
6	0,358	0,365	0,329	0,351	3,64	1,908	5,443	0,0473	13,499
7	0,241	0,226	0,260	0,242	2,90	1,703	7,031	0,0423	17,438
8	0,578	0,588	0,567	0,578	1,10	1,050	1,818	0,0260	4,509
9	0,498	0,472	0,493	0,488	1,90	1,379	2,829	0,0342	7,016
10	0,323	0,304	0,296	0,308	1,92	1,387	4,508	0,0344	11,179
11	0,442	0,439	0,481	0,454	5,49	2,343	5,161	0,0581	12,799
12	0,275	0,287	0,278	0,280	0,39	0,625	2,230	0,0155	5,531
13	0,314	0,330	0,314	0,319	0,85	0,924	2,893	0,0229	7,174
14	0,245	0,284	0,281	0,270	4,71	2,170	8,038	0,0538	19,934
15	0,334	0,332	0,298	0,321	4,09	2,023	6,296	0,0502	15,615

Для анализа уравнения регрессии (1) построены трёхмерные графики влияния глубины бороздообразования h , длины поводков l , массы m сошника на время t затухания колебаний подвеса сошника (рис. 3).

Реализация эксперимента в целом подтвердила результаты теоретических исследований [13]. Стабильность движения сошника зависит от конструктивных параметров сошниковой группы: длины l поводков и, в меньшей мере, массы m сошника, но наиболее значимо на нее влияет технологический параметр – глубина h бороздообразования, которая прямо определяет величину сопротивления почвы перемещению сошника.

Увеличение глубины h бороздообразования с 10 до 50 мм снижает время переходного процесса при фиксированном значении массы сошника $m = 1,8$ кг и длине поводка $l = 0,08$ м на 37,8 %, при $l = 0,18$ м – на 45,5 % (рис. 3, в); при фиксированном значении длины поводка $l = 0,13$ м и массы сошника $m = 1,4$ кг – на 37,8 %, при $m = 2,2$ кг – на 35,7 % (рис. 3, б).

Возрастание длины l поводков механизма подвеса с 0,08 до 0,18 м приводит к

увеличению времени затухания колебаний сошника при нулевом уровне фактора x_1 ($h = 30$ мм) и $m = 1,4$ кг на 16,7 %, при $m = 2,2$ кг – на 34,7 % (рис. 3, а); при $x_3 = 0$ ($m = 1,8$ кг) и $h = 10$ мм – на 34,5 %, при $h = 50$ мм – на 22,5 % (рис. 3, а).

Увеличение же массы m сошника с 1,4 до 2,2 кг обуславливает рост времени необходимого системе для достижения динамического равновесия при постоянном значении $h = 30$ мм в диапазоне изменения длины l поводков от 13,8 до 34,6 % (рис. 3, а); при постоянном значении $l = 0,13$ м в диапазоне изменения глубины h хода сошника – от 16,4 до 27,7 % (рис. 3, б).

Для выбранных геометрических параметров экспериментального образца сошниковой группы и установленной эквивалентной жёсткости пружин кручения, равной $c = 240$ Н·м/рад, диапазон минимальных значений времени переходного периода находится в пределах 0,212...0,218 с и соответствует глубине бороздообразования $h = 41,3...50,0$ мм, длине поводков $l = 0,13$ м, массе сошника $m = 1,7...1,8$ кг.

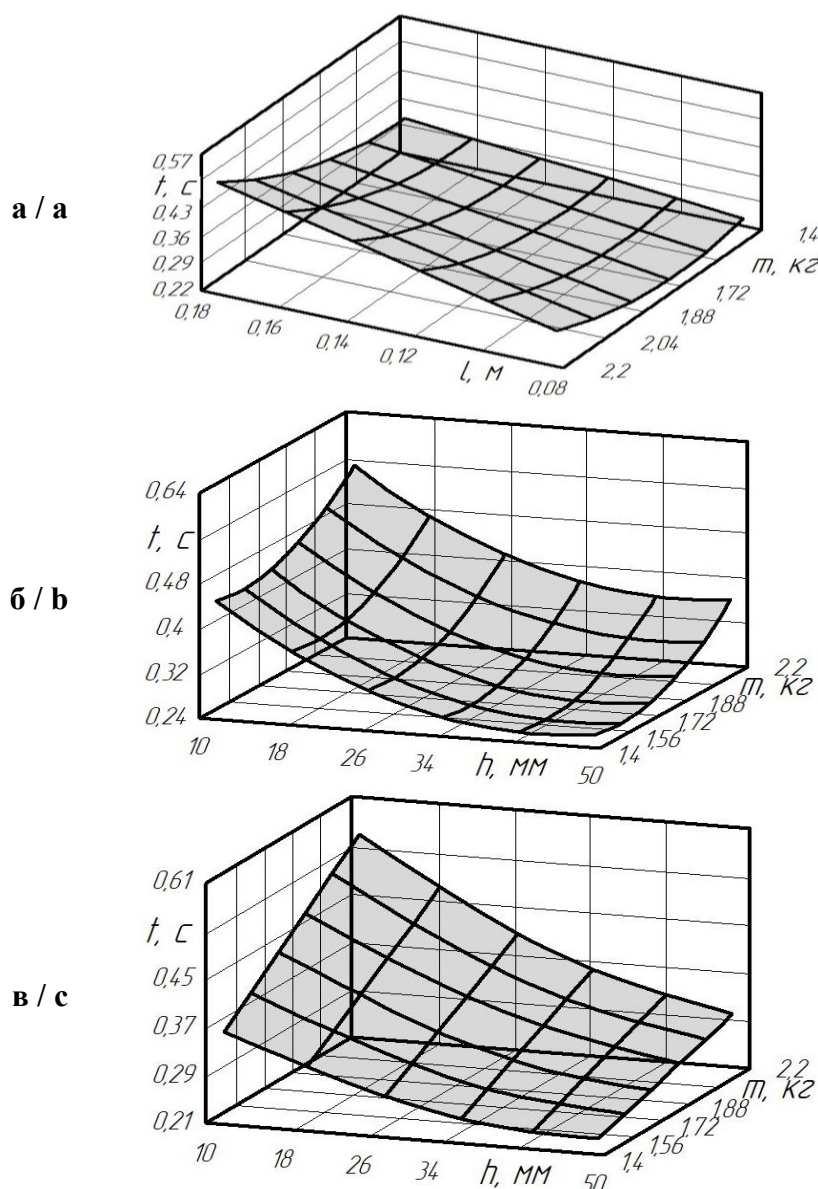


Рис. 3. Влияние глубины h бороздообразования, мм (x_1), длины l поводков, м (x_2), массы m сошника, кг (x_3) на время, t , с (Y) затухания колебаний механизма подвеса сошниковой группы при: а – $h = 30$ мм ($x_1 = 0$); б – $l = 0,13$ м ($x_2 = 0$); в – $m = 1,8$ кг ($x_3 = 0$) /

Fig. 3. Influence of depth h , mm (x_1) furrowing, length l , m (x_2) of leashes, mass m , kg, of opener (x_3) on time t , s, (Y) damping of oscillations of the suspension mechanism of the coulter group at: а – $h = 30$ mm ($x_1 = 0$); б – $l = 0.13$ m ($x_2 = 0$); в – $m = 1.8$ kg ($x_3 = 0$)

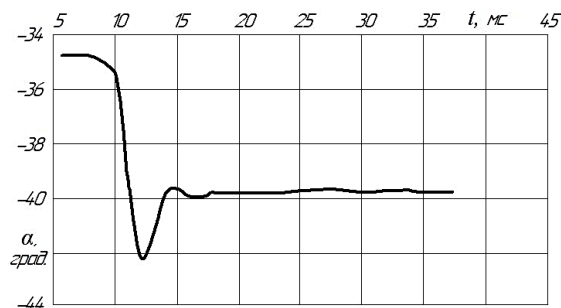
В составе лабораторной установки для регистрации данных использован датчик Wit-Motion WT901, что позволило достаточно точно определить траектории движения сошника в продольно-вертикальной плоскости при достижении им динамического равновесия. Часть из них, наиболее информативно иллюстрирующих влияние изучаемых факторов на характер колебаний, представлена на рисунке 4. Траекторию сошника определяют угол α , град., наклона поводков к горизонтали при достижении сошниковой группы динамического равновесия, который равен $\alpha = \alpha_0 \pm \varphi_0$, где α_0 – первоначальный угол установки поводков подвеса,

град., φ_0 – угол отклонения поводка от первоначального угла установки при достижении сошниковой группы динамического равновесия, град., и время t , мс.

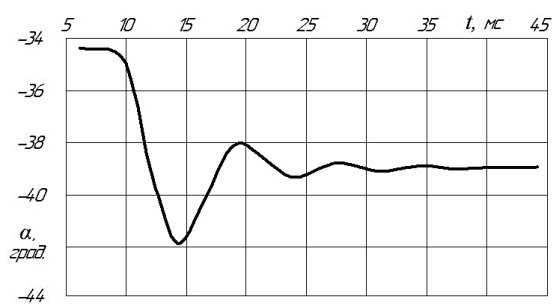
Начальное положение поводков механизма подвеса сошника, определяемое углом наклона α , град., поводков к горизонтали, соответствует их первоначальному отклонению от положения статического равновесия в начале опыта и составляет 5° . При начале движения сошник сходит с опорной поверхности ящика с почвой и погружается в почву, что имитирует начальный момент вхождения

сошника в почву при начале работы сеялки или его наезд на твердый предмет в процессе посева. Далее рабочий орган совершает одно или несколько затухающих колебаний и достигает положения динамического равновесия,

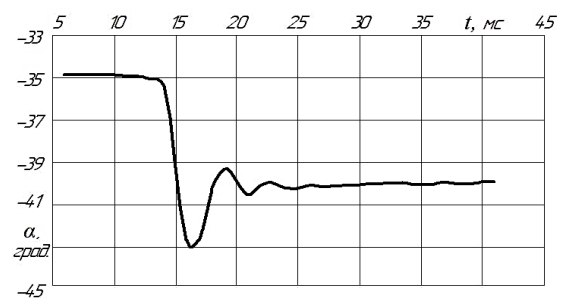
соответствующего точке баланса между сопротивлением почвы передвижению сошника и усилием пружин кручения, направленных на заглубление сошника.



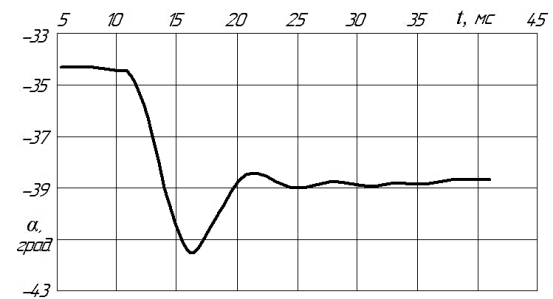
а / а



б / б



в / с



г / г

Рис. 4. Траектории движения сошника в продольно-вертикальной плоскости в процессе достижения им динамического равновесия при: а – $h = 50$ мм ($x_1 = 1$), $l = 0,08$ м ($x_2 = -1$), $m = 1,8$ кг ($x_3 = 0$); б – $h = 10$ мм ($x_1 = -1$), $l = 0,18$ м ($x_2 = 1$), $m = 1,8$ кг ($x_3 = 0$); в – $h = 30$ мм ($x_1 = 0$), $l = 0,08$ м ($x_2 = -1$), $m = 1,4$ кг ($x_3 = -1$); г – $h = 30$ мм ($x_1 = 0$), $l = 0,18$ м ($x_2 = 1$), $m = 2,2$ кг ($x_3 = 1$) /

Fig. 4. The trajectories of the coulter in the longitudinal-vertical plane in the process of achieving dynamic equilibrium with: а – $h = 50$ mm ($x_1 = 1$), $l = 0.08$ m ($x_2 = -1$), $m = 1.8$ kg ($x_3 = 0$); б – $h = 10$ mm ($x_1 = -1$), $l = 0.18$ m ($x_2 = 1$), $m = 1.8$ kg ($x_3 = 0$); в – $h = 30$ mm ($x_1 = 0$), $l = 0.08$ m ($x_2 = -1$), $m = 1.4$ kg ($x_3 = -1$); г – $h = 30$ mm ($x_1 = 0$), $l = 0.18$ m ($x_2 = 1$), $m = 2.2$ kg ($x_3 = 1$)

Минимальное время перехода сошниковой группы в состояние динамического равновесия составляет $t = 0,218$ с и получено при среднем значении массы сошника $m = 1,8$ кг, максимальной глубине бороздообразования $h = 50$ мм и минимальной длине поводков $l = 0,08$ м (рис. 4, а), максимальное – $t = 0,554$ с и соответствует минимуму глубины хода сошника $h = 10$ мм и максимуму длины поводков $l = 0,18$ м (рис. 4, б). При нулевом уровне глубины погружения сошника в почву $h = 30$ мм наименьшее время затухания колебаний сошника получено при нижних уровнях длины поводков l и массы сошника m , максимальное – при верхних уровнях данных факторов (рис. 4, в, г). При этом характер траекторий сошника в ходе переходного процесса, частично представленных на рисунке 4, в большинстве опытов соответствует затухающему колебательному движению рабочих органов

и только в ряде случаев представляет предельно аperiodическое движение. Согласно исследованиям ряда авторов [14], наиболее приемлемым по времени возвращения рабочего органа в поле допуска рабочего процесса является предельно аperiodическое движение, либо движение на стыке затухающего колебательного и предельно аperiodического движения.

Наибольшее влияние на время затухания t колебаний сошника оказывает сопротивление почвы его перемещению, определяемое в эксперименте глубиной бороздообразования h , в особенности её вертикальная составляющая. Посев мелкосемянных культур, к которым относится большинство трав, проводится на глубину 10...20 мм, что примерно соответствует глубине бороздообразования 30...40 мм. В связи с этим, можно предположить, что одним из вариантов снижения времени затухания t колебаний может быть увеличение площади

опорной поверхности килевидного сошника, повышающее величину вертикальной составляющей сопротивления почвы.

Зависимость времени t переходного процесса от значений длины l поводков и массы m сошника менее значимо, при этом окончательный выбор значений этих параметров во многом определяется конструктивно-технологическими требованиями, предъявляемыми к сошниковой группе. В частности, если уменьшение массы m сошника до минимальных значений фактора конструктивно оправдано, то чрезмерное снижение длины l поводков негативно повлияет на возможности сошниковой группы по копированию микрорельефа поверхности.

Закключение. Получена модель регрессии функционирования сошниковой группы дернинной сеялки с креплением сошника килевидного типа на параллелограммном механизме подвеса в виде пружин кручения, отличаю-

щаяся их вертикальным размещением на раме сеялки (патент РФ №2772128), позволяющая на стадии проектирования определить основные параметры её пружинного механизма подвеса. Реализован план эксперимента Бокса-Бенкина второго порядка для трёх факторов, который позволил определить зависимость времени t затухания колебаний механизма подвеса сошниковой группы от следующих факторов: глубины h бороздообразования мм, длины l поводков механизма подвеса, m и массы m сошника килевидного типа, кг. Для выбранных геометрических параметров экспериментального образца сошниковой группы и установленной эквивалентной жёсткости пружин кручения, равной $c = 240 \text{ Н} \cdot \text{м/рад}$, диапазон минимальных значений времени переходного периода находится в пределах $t = 0,212 \dots 0,218 \text{ с}$ и соответствует глубине бороздообразования $h = 41,3 \dots 50,0 \text{ мм}$, длине поводков $l = 0,13 \text{ м}$, массе сошника $m = 1,7 \dots 1,8 \text{ кг}$.

Список литературы

1. Хухта Х., Минин В. Б. Основные принципы органического сельского хозяйства. Санкт-Петербург: АСПИРСТ; Миккелли, 2014. 40 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007979139>
2. Зотов А. А., Косолапов В. М., Кобзин А. Г., Трофимов И. А., Уланов А. Н., Шевцов А. В., Шельменкина Х. Х., Шукин Н. Н. Сенокосы и пастбища на осушаемых землях Нечерноземья. Кокшетау: ИП "Изотова К. У.", 2012. 1198 с. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18823927&EDN:PVYALX>
3. Baker C. J., Saxton K. E., Ritchie W. R., Chamen W. C. T., Reicosky D. C., Ribeiro M. F. S., Justice S. E., Hobbs P. R. No-tillage seeding in conservation agriculture. 2nd ed. FAO and CAB International, 2007. 326 p. URL: <http://www.fao.org/3/a-al298e.pdf>
4. Welty L. E., Hensleigh P. F., Stewart V. R. Methods for Sod-Seeding of Small-Seeded Legumes and Grasses. Montana State University is an Equal Opportunity. 15 p. URL: <https://animalrangeextension.montana.edu/forage/documents/methods%20for%20sod-seeding%20of%20small-seeded%20legumes%20and%20grasses.pdf>
5. Соколов А. В., Замана С. П., Патлай В. В., Федоровский Т. Г., Киндсфатер В. Я. Совершенствование технологического процесса и технических средств для прямого подсева трав в дернину природных кормовых угодий. Кормопроизводство. 2012;(4):44-46. Режим доступа: <http://kormoproizvodstvo.ru/files/arhiv/4.12.pdf>
6. Ревенко В. Ю., Белоусов М. М. Результаты испытаний машины для полосного подсева трав в дернину. Международная агроинженерия. 2014;(4 (12)):53-61. Режим доступа: <http://www.spsae.kz/uploads/images/2014%204.pdf>
7. Полищук Ю. В., Лаптев Н. В., Комаров А. П. Комбинированные орудия для полосного подсева в технологии поверхностного улучшения старовозрастных многолетних трав. Научное обеспечение животноводства Сибири: мат-лы V Международ. научн.-практ. конф. Красноярск, 2021. С. 52-56.
8. Курбанов Р. Ф., Созонтов А. В. Эффективность технологии многокомпонентного полосного посева многолетних трав в дернину. Пермский аграрный вестник. 2017;(3 (19)):40-44. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30009673&EDN:ZGSGBX>
9. Демшин С. Л., Исупов А. Ю., Гайдидей С. В., Зырянов Д. А., Демшин К. С. Механизм подвески сошника. Пат. № 2772128 Российская Федерация. № заявки: 2021111764; заявл. 23.04.2021; опубл. 18.05.2022. Бюл. №14. 9 с. Режим доступа: <https://patents.google.com/patent/RU2772128C1/ru>
10. Сысуйев В. А., Демшин С. Л., Черемисинов Д. А., Доронин М. С. Способ полосного посева семян трав в дернину и сеялка для его осуществления: пат. №2641073 Российская Федерация. №2016108377; заявл. 09.03.2016, опубл. 15.01.2018, Бюл. №2. 11 с. Режим доступа: <https://patents.google.com/patent/RU2641073C2/ru>
11. Sysuev V. A., Kurbanov R. F., Demshin S. L., Saitov V. E., Doronin M. S. Parameters and operating modes of the coulter group of the sod seeder. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021;723(2):022050. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/723/2/022050>
12. Сысуйев В. А., Демшин С. Л., Черемисинов Д. А., Доронин М. С. Повышение качества полосного посева семян трав в дернину. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2017;(5):63-68. Режим доступа: <https://www.agronauka-sv.ru/jour/article/view/163/163>
13. Гайдидей С. В., Демшин С. Л., Исупов А. Ю. Исследование динамики сошниковой группы сеялки полосного посева. Таврический вестник аграрной науки. 2022;(4 (32)):34-46. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49982561&EDN:MTRGVE>
14. Кормициков А. Д. Техника и технологии для склоновых земель. Теория, технологический расчет, развитие. Киров: НИИСХ Северо-Востока, 2002. 297 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01002460263>

References

1. Khukhta Kh., Minin V. B. Basic principles of organic agriculture. Saint-Petersburg: *ASPIRST; Mikkeli*, 2014. 40 p. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007979139>
2. Zotov A. A., Kosolapov V. M., Kobzin A. G., Trofimov I. A., Ulanov A. N., Shevtsov A. V., Shelmenkina Kh. Kh., Shchukin N. N. Hayfields and pastures on drained lands of the Non-Black Earth Region. Kokshetau: *IP "Izotova K. U."*, 2012. 1198 p. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18823927&>
3. Baker C. J., Saxton K. E., Ritchie W. R., Chamen W. C. T., Reicosky D. C., Ribeiro M. F. S., Justice S. E., Hobbs P. R. No-tillage seeding in conservation agriculture. 2nd ed. FAO and CAB International, 2007. 326 p. URL: <http://www.fao.org/3/a-al298e.pdf>
4. Welty L. E., Hensleigh P. F., Stewart V. R. Methods for Sod-Seeding of Small-Seeded Legumes and Grasses. Montana State University is an Equal Opportunity. 15 p. URL: <https://animalrangeextension.montana.edu/forage/documents/methods%20for%20sod-seeding%20of%20small-seeded%20legumes%20and%20grasses.pdf>
5. Sokolov A. V., Zamana S. P., Patlay V. V., Fedorovskiy T. G., Kindsfater V. Ya. Improving the technological process and means for direct grasses undersowing into grassland sod of natural fodder lands. *Kormoproizvodstvo* = Forage Production. 2012;(4):44-46. (In Russ.). URL: <http://kormoproizvodstvo.ru/files/arhiv/4.12.pdf>
6. Revenko V. Yu., Belousov M. M. Results of tests of the car for band podsev of herbs in dernina. *Mezhdunarodnaya agroinzheneriya* = International Agro-engineering. 2014;(4 (12)):53-61. (In Kazakhstan). URL: <http://www.spcac.kz/uploads/images/2014%204.pdf>
7. Polishchuk Yu. V., Laptev N. V., Komarov A. P. Combined implements for strip seeding in the technology of surface improvement of old-growth perennial grasses. Scientific support for animal husbandry in Siberia: materials of the V International scientific-practical conf. Krasnoyarsk, 2021. pp. 52-56.
8. Kurbanov R. F., Sozontov A. V. An efficiency of a technology of multi-component strip sowing of perennial grasses in sod. *Permskiy agrarnyy vestnik* = Perm Agrarian Journal. 2017;(3 (19)):40-44. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30009673>
9. Demshin S. L., Isupov A. Yu., Gaydidey S. V., Zyryanov D. A., Demshin K. S. Opener suspension mechanism: Patent RF, no. 2772128, 2022. URL: <https://patents.google.com/patent/RU2772128C1/ru>
10. Sysuev V. A., Demshin S. L., Cheremisinov D. A., Doronin M. S. A method for strip sowing grass seeds in turf and a seeder for its implementation: Patent RF, no. 2641073. 2018. URL: <https://patents.google.com/patent/RU2641073C2/ru>
11. Sysuev V. A., Kurbanov R. F., Demshin S. L., Saitov V. E., Doronin M. S. Parameters and operating modes of the coulter group of the sod seeder. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021;723(2):022050. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/723/2/022050>
12. Sysuev V. A., Demshin S. L., Cheremisinov D. A., Doronin M. S. Improvement quality of strip sowing of grasses' seeds into a sod. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2017;(5):63-67. (In Russ.). URL: <https://www.agronauka-sv.ru/jour/article/view/163/163>
13. Gaydidey S. V., Demshin S. L., Isupov A. Yu. Analysis of the dynamics of the coulter group of the sod seeder for strip sowing. *Tavricheskiy vestnik agrarnoy nauki* = Taurida herald of the agrarian sciences. 2022;(4 (32)):34-46. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49982561>
14. Kormshchikov A. D. Equipment and technologies for sloping lands. Theory, technological calculation, development. Kirov: *NIISKh Severo-Vostoka*, 2002. 297 p. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01002460263>

Сведения об авторах

Сысцев Василий Алексеевич, академик РАН, научный руководитель, ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого», д. 166а, ул. Ленина, г. Киров, Российская Федерация, 610007, e-mail: priemnaya@fanc-sv.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1172-005X>

✉ **Демшин Сергей Леонидович**, доктор техн. наук, доцент, зав. лабораторией, ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого», д. 166а, ул. Ленина, г. Киров, Российская Федерация, 610007, e-mail: priemnaya@fanc-sv.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7562-7965>, e-mail: sergdemshin@mail.ru

Гайдидей Сергей Владимирович, соискатель, ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого», д. 166а, ул. Ленина, г. Киров, Российская Федерация, 610007, e-mail: priemnaya@fanc-sv.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6112-5411>

Зырянов Дмитрий Алексеевич, кандидат техн. наук, научный сотрудник, ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого», д. 166а, ул. Ленина, г. Киров, Российская Федерация, 610007, e-mail: priemnaya@fanc-sv.ru

Information about the authors

Vasily A. Sysuev, the academician of the RAS, academic advisor, Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky, 166a, Lenin str., Kirov, Russian Federation, 610007, e-mail: priemnaya@fanc-sv.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1172-005X>

✉ **Sergey L. Demshin**, DSc in Engineering, associate professor, 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: <http://orcid.org/0000-0001-7562-7965>, e-mail: sergdemshin@mail.ru

Sergey V. Gaididei, applicant, 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/0000-0001-6112-5411>

Dmitry A. Zyryanov, PhD in Engineering, 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

✉ – Для контактов / Corresponding author

ДИСКУССИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ / DISCUSSION PAPERS

Использование методов многомерной статистики в биологических исследованиях / **The use of multivariate statistics methods in biological research**

Редакция журнала открывает новую дискуссионную тему «Использование методов многомерной статистики в биологических исследованиях» публикацией статьи Василия Михайловича Кузнецова *«Анализ полокусных оценок аллельного разнообразия STR-маркеров в выборке быков-производителей»*. Цель работы – оценка разными методами внутривидового (α) и межвидового (β) аллельного разнообразия по каждому локусу в выборке животных, генотипированных по микросателлитам ДНК, с последующим традиционным и многомерным статистическим анализом полученных показателей для выявления неслучайных межлокусных отношений.

Статья неординарная, довольно специфичная. На примере полиморфизма микросателлитов крупного рогатого скота автор демонстрирует целый арсенал математико-статистических приёмов и методов анализа генетического разнообразия и не только. Не ограничивается использованием обширного перечня компьютерных программ и, что особенно ценно, вкратце комментирует их алгоритмы, лаконично и ёмко интерпретирует и иллюстрирует полученные результаты.

Мы надеемся, что публикация этого материала будет способствовать широкому профессиональному обсуждению проблем эффективности использования микросателлитов и однонуклеотидного полиморфизма, расчета геномной племенной ценности и геномного инбридинга, оценки α - и β -аллельного разнообразия, значимых и важных не только для селекции и сохранения пород животных, но и сортов растений.

Редакция приглашает ученых принять участие в обсуждении обозначенной проблемы. Краткие сообщения по опубликованной статье с пометкой «Дискуссия» просьба направлять по адресу: agronauka-esv@fanc-sv.ru. Оригинальные и обзорные статьи по теме дискуссии загружаются на сайт журнала в установленном порядке и публикуются после рецензирования.

Главный редактор журнала академик РАН В. А. Сусуев

Анализ полокусных оценок аллельного разнообразия STR-маркеров в выборке быков-производителей

© 2023. В. М. Кузнецов ✉

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

Генотипы по 11 локусам микросателлитов ДНК 84 быков семи пород использовали для полокусной оценки 14 показателей аллельного разнообразия/дифференциации. К сформированным матрицам данных из оригинальных и преобразованных оценок размерностью 11×14 применены традиционные и многомерные методы статистики. Наименьшей изменчивостью характеризовались оценки гетерозиготности – 8-14 %. Изменчивость числа аллелей на локус и показателей дифференциации пород была на уровне 20-26%, индексов фиксации – 38-44 %. Установлены статистически значимые корреляции Кендалла (0,8-1,0) между показателями аллельного богатства и гетерозиготности, индексами фиксации, показателями дифференциации. Изменчивость преобразованных оценок показателей разнообразия/дифференциации в пределах локуса была в диапазоне 6-32%, в том числе, по локусам Eth3, Tgla122, Eth225, Bm2113 – 6-12%, локусам Inra23, Tgla126, Eth10 – 15-20 %, локусам Tgla227, Sps115, Tgla53, Bm1824 – 28-32 %. Непараметрический тест Манн-Уитни-Уилсона показал статистически значимые различия медиан локуса Eth3 с локусом Bm2113, локуса Tgla126 с локусами Eth3, Inra23, Tgla122, Eth225, Bm2113, Bm1824, Eth10. Анализ главных компонент (PCA) выделил две компоненты с общей информативностью 95,2 %. Первая учитывала 59,4 % общей дисперсии, имела наибольшие нагрузки по показателям внутривидового разнообразия и была определена как «альфа-компонента». Вторая объясняла 35,8 % общей дисперсии, имела высокие нагрузки по показателям межвидовой дифференциации и была определена как «бета-компонента». 2D-PCA-ординация показала, что для анализируемых породных выборок, локусов и мер разнообразия имела место характерная группировка локусов. Локусы Tgla227 и Tgla53 сформировали группу А, группу В – локусы Tgla122, Eth225, Eth10, группу С – локусы Inra23, Bm2113 и Bm1824. Локусы условной группы D (Eth3, Tgla126, Sps115) были определены как «нетипичные». Валидность ординации подтверждали расчётами по редуцированным данным (размерностью 11×7) и методом неметрического многомерного шкалирования (nMDS). Согласованность ординаций по тесту Прокруста была 96 % ($p_{\text{perm}} = 0,001$). Аналогичную классификацию локусов дал кластерный анализ (UPGMA) с бутстрэп-вероятностями кластера А – 73 %, В – 100 %, С – 73 %, D – 47 %. Были рассчитаны дистанции и показатели сходства (S) профилей локусов со сводными оценками по 11 локусам (определены как «истинные»). Локусы Tgla126 и Sps115 имели $S \approx 40$ %, Tgla53 и Bm1824 – на уровне 60 %; Inra23, Tgla227 и Bm2113 – 70-75 %, локусы Eth3, Tgla122, Eth225 и Eth10 – 84-88 %. Среднее абсолютное отклонение оценок показателей разнообразия по четырём локусам с $S \geq 84$ % от «истинных» оценок было 3,4 %, по четырём локусам с $S \leq 60$ % – 12,4 %. По компонентным оценкам для каждого локуса был рассчитан тотальный показатель разнообразия (γLV). Линейная связь γLV с полокусными оценками γ -разнообразия с вероятностью 95 % находилась в интервале 0,73-0,98, ранговая корреляция Кендалла была 0,67 ($p_{\text{value}} = 0,005$). Проведённое исследование вносит определённый вклад в расширение инструментария для обработки молекулярно-генетических данных при анализе аллельного разнообразия в подразделённых популяциях.

Ключевые слова: крупный рогатый скот, локусы, микросателлиты, разнообразие, дифференциация, методы многомерной статистики, ординация

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого» (№ гос. регистрации 123011900029-6).

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 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>

Поступила: 17.02.2023

Принята к публикации: 31.08.2023

Опубликована онлайн: 30.10.2023

Analysis of locus estimates of allelic diversity of STR markers in a sample of breeding bulls

© 2023. Vasily M. Kuznetsov ✉

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

Genotypes of the 11 DNA microsatellite loci of 84 bulls of seven breeds were used to evaluate 14 indicators of allelic diversity/differentiation. Traditional and multidimensional statistical methods were applied to the data matrices from the original and transformed estimates (11×14). Estimates of heterozygosity had coefficients of variability of 8-14 %, the number

of alleles per locus and indicators of differentiation of breeds at the level of 20-26 %, fixation indices – 38-44 %. Statistically significant Kendall correlations (0.8-1.0) between indicators of allelic richness and heterozygosity, fixation indices, and differentiation indicators were established. The variability of the transformed estimates of diversity/differentiation indicators by loci was in the range of 6-32 %. Including by loci Eth3, Tgla122, Eth225, Bm2113 – 6-12 %, loci Inra23, Tgla126, Eth10 – 15-20 %, loci Tgla227, Sps115, Tgla53, Bm1824 – 28-32 %. The nonparametric Mann-Whitney-Wilcoxon test showed statistically significant differences in the medians of the Eth3 locus with the Bm2113 locus, the Tgla126 locus with the Eth3, Inra23, Tgla122, Eth225, Bm2113, Bm1824, Eth10 loci. The principal component analysis (PCA) identified two components with a total information content of 95,2 %. The first one took into account 59.4 % of the total variance, had the highest loads in intra-breed diversity data and was defined as an «alpha component». The second accounted for 35.8 % of the total variance, had the highest loads in inter-breed differentiation data and was defined as a «beta component». 2D-PCA-ordination showed that a characteristic grouping of loci took place for the analyzed breeds (samples), loci and measures of diversity. Loci Tgla227 and Tgla53 formed group A, group B – loci Tgla122, Eth225, Eth10, group C – loci Inra23, Bm2113 and Bm1824. The loci of the conditional group D (Eth3, Tgla126, Sps115) were defined as «untypical». Validation of ordination was confirmed by calculations on reduced data (dimension 11×7) and the method of non-metric multidimensional scaling (nMDS). The consistency of ordinations according to the Procrust test was 96 % ($p_{perm} < 0.001$). A similar classification of loci was obtained by cluster analysis (UPGMA) with bootstrap probabilities of cluster: A – 73, B – 100, C – 73, D – 47 %. The distances and similarity indicators (S) between the profiles of loci and the «true» summary estimates for 11 loci were calculated. Loci Tgla126 and Sps115 had $S \approx 40$ %, loci Tgla53 and Bm1824 – at the level of 60 %, loci Inra23, Tgla227 and Bm2113 – 70-75 %, loci Eth3, Tgla122, Eth225 and Eth10 – 84-88 %. The average absolute deviation of the estimates of diversity indicators for the four loci with $S \geq 84$ % from the «true» estimates was 3.4 %, for the four loci with $S \leq 60$ % – 12.4 %. According to component scores, a general diversity index, γ_{LV} , was calculated for each locus. Its correlation with the estimates of the Shannon/Sherwin's γ -diversity with a 95 % probability value was in the range of 0.73-0.98, Kendall's rank correlation was 0.67 ($p_{value} = 0.005$). The conducted research makes a certain contribution to the expansion of tools for processing molecular genetic data in the analysis of allelic diversity in subdivided populations.

Keywords: cattle, loci, microsatellites, diversity, differentiation, methods of multidimensional statistics, ordination

Acknowledgements: the research was carried out under the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of the Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky (theme No. 123011900029-6).

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 citation: 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>

Received: 17.02.2023

Accepted for publication: 31.08.2023

Published online: 30.10.2023

В последние годы ДНК-маркеры находят всё большее применение в исследованиях по генетике, селекции, разведению коммерческих и сохранению вытесняемых российских пород сельскохозяйственных животных. Изучается эффективность использования микросателлитов и однонуклеотидного полиморфизма [1], рассчитывается геномная племенная ценность [2] и геномный инбридинг животных [3], оценивается генетическое разнообразие внутри (α) и между (β) породами крупного рогатого скота [4, 5], лошадей [6], овец [7], свиней [8], оленей [9].

Для измерения α - и β -разнообразия был предложен ряд статистик: Райта, Нея, Вейра и Кокерхэма, Джоста, Чао, Шеннона/Шервина [10, 11, 12, 13, 14, 15], которые базируются на разных биологических и математических допущениях. Проводится сравнительный анализ этих мер разнообразия [16, 17, 18]. Все они способствуют получению той или иной информации о различных аспектах аллельного разнообразия, демографической истории и/или диф-

ференциации пород, о структуре генетической изменчивости популяций.

В исследованиях подобного рода обычно анализируются несколько породных выборок и ряд локусов, по которым рассчитываются сводные оценки разнообразия/дифференциации и/или парные (между породами) генетические дистанции. Как представляется, не менее интересным и полезным может быть сравнительный анализ оценок разнообразия/дифференциации по каждому локусу и поиск путей использования разных показателей для комплексной характеристики генетической изменчивости. Например, векторы/профили полукусных оценок побуждают к использованию методов ординации, которые позволяют обнаружить скрытые (латентные) обобщающие характеристики организационной структуры, визуализировать сходство и различие изучаемых локусов, их кластеризацию. Или, если в рамках нейтральной модели доверительные интервалы оценок показателей разнообразия (например,

по F_{ST}) по каким-либо локусам не перекрываются ($p_{value} \leq 0,05$), то это может указывать на наличие возмущающего фактора(-ов), что, в свою очередь, может мотивировать проведение дальнейших углублённых исследований.

Цель настоящей работы – полокусная оценка разными методами α - и β -разнообразия в выборке животных, генотипированных по ДНК-маркерам, с последующим традиционным и многомерным статистическим анализами полученных показателей для выявления неслучайных межлокусных отношений.

Материал и методы. В работе использовали те же данные, что и в предыдущих публикациях [16, 17, 18]. В частности, 84 быка, каждый генотипирован по 11 STR-локусам (микросателлиты ДНК)¹: 10 быков джерсейской породы, 10 – айрширской породы, 10 – красной датской, 9 – красной шведской и 45 быков голштинской породы трёх «экотипов» (отродий): 13 быков из Германии, 17 – из Нидерландов, 15 – из США.

По каждому локусу рассчитывали 14 показателей (характеристик) аллельного разнообразия:

- «аллельное богатство» на локус (n_a – фактическое число аллелей, n_e – число эффективных аллелей по гетерозиготности, s_{n_e} – число эффективных аллелей по энтропии);
- гетерозиготность (H_o – фактическая, H_e – ожидаемая);
- индексы фиксации ($G_{ST(NEI)}$ – по Нею, $F_{ST(W\&C)}$ – по Кокерхэму и Вейру);
- дифференциация породных выборок на базе гетерозиготности ($G''_{ST(HED)}$ и $F'_{ST(W\&C)}$ – модифицированные индексы фиксации, D_{JOST} – по Джосту, D_{CHAO} – по Чао) и
- α -, β - и γ -разнообразие на базе энтропии по Шеннону/Шервину (D'_α – внутривыборочное, D'_β – межвыборочное, D'_γ – общее).

Показатели первых двух пунктов относились к α -разнообразию, следующих двух – к β -разнообразию, которые, при наличии нескольких породных выборок, характеризовали изменчивость оценок α -разнообразия

в пространстве. Методические стороны оценивания рассмотрены в [10, 11, 16, 17, 18]. Для анализа полокусных оценок применяли методы традиционной (описательная статистика, парное сравнение средних и медиан, ковариационный анализ) и многомерной статистики (анализ главных компонент, неметрическое многомерное шкалирование, кластерный анализ и анализ Прокруста). Использовали компьютерные программы GenAlEx 6.502 [20, 21, 22], PAST3 [23], KyPlot 6.0 [24], STATGRAPHICS® Centurion XVI², прокрустов анализ проводили по алгоритмам [25, 26, 27].

Основная часть. *Оценки показателей разнообразия.* В таблице 1 даны полокусные оценки показателей аллельного разнообразия/дифференциации; в последнем столбце – сводные оценки по всем локусам³.

Каждый из 11 локусов был представлен вектором оценок 14 характеристик-признаков – показателей разнообразия, которые формировали набор данных размерностью 11×14 (**Data1**). Число аллелей на локус (n_a) было в диапазоне от 3,9 (локус 6) до 7 (локус 8), эффективных аллелей по энтропии (s_{n_e}) – от 2,5 (локус 6) до 5,4 (локус 3), наблюдаемой гетерозиготности (H_o) – от 49 до 78 % (локусы 6 и 8), индекса фиксации по Нею ($G_{ST(NEI)}$) – от 4,9 до 18,6 % (локусы 8 и 10), дифференциации породных выборок по Шеннону/Шервину – от 22,1 до 43,8 % (локусы 4 и 2) и т.п. Все переменные «прошли» W-тест (Shapiro-Wilk) на нормальность распределения. Коэффициенты изменчивости (CV) оценок D'_α и D'_γ составили 8-10 %; H_o и H_e – 14 %; n_a , n_e , s_{n_e} , $G''_{ST(HED)}$, $F'_{ST(W\&C)}$, D_{JOST} , D_{CHAO} и D'_β – 20-26 %; $G_{ST(NEI)}$, $F_{ST(W\&C)}$ (индексы фиксации) – 38-44 %.

Величины переменных таблицы 1 (p_{km}) имели разные шкалы и единицы измерения, что делало невозможным применение статистики по локусам. Поэтому p_{km} были преобразованы к единому масштабу⁴. «Обезразмеренную» переменную (p'_{km}) можно интерпретировать как «процент вклада k-го локуса в сводную оценку m-ой переменной по всем локусам».

¹STR – Simple Tandem Repeats – участки ДНК длиной 2-6-9 нуклеотидов, tandemно повторенных 5-40 раз с частотой мутаций (изменений в геноме) от 10^{-6} до 10^{-2} в разных локусах (10^{-6} – одна мутация на один миллион событий репликации – удвоения молекулы ДНК). Аллели с более высоким числом повторов часто мутируют с более высокой скоростью; связь экспоненциальная [19].

²STATGRAPHICS® Centurion XVI User Manual. By StatPoint Technologies, Inc. 2010. 297 p.

³Из 77 тестов согласия распределений генотипов с равновесием Харди-Вайнберга (PXB) в двух случаях имело место статистически значимое отклонение от PXB: по локусу Eth10 в выборке быков джерсейской породы и по локусу Eth225 в выборке голштинских быков из Германии.

⁴Использовалась формула: $p'_{km} = 100 \times p_{km} / (p_{1m} + p_{2m} + \dots + p_{km} + \dots + p_{Km})$, где k – локус, K – число локусов, m – переменная.

Таблица 1 – Оценки показателей разнообразия 11 STR-локусов (Data1: 11×14) /
Table 1 – Estimates of diversity indicators of 11 STR loci (Data1: 11×14)

Variable	Eth3	Inra23	Tgla227	Tgla126	Tgla122	Sps115	Eth225	Tgla53	Bm2113	Bm1824	Eth10	1-11
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	
n_a	4,1	4,1	6,9	4,1	5,7	3,9	5,4	7,0	5,0	3,9	5,3	5,0
n_e	2,7	2,9	4,7	2,4	3,9	2,1	3,7	4,4	3,8	2,5	4,1	3,4
s_{n_e}	3,0	3,2	5,4	2,9	4,4	2,5	4,1	5,1	3,9	2,8	4,4	3,7
H_o , %	79	76	79	60	79	54	81	84	84	61	78	74
H_e , %*	61	62	78	58	72	49	71	75	69	56	75	66
$G_{ST(NEI)}$, %*	11,8	14,6	5,0	7,4	8,2	16,7	9,4	4,9	12,1	18,6	7,2	10,3
$F_{ST(W\&C)}$, %	12,8	14,8	5,7	7,8	9,3	16,0	10,8	5,8	12,2	18,3	8,0	10,8
$G'_{ST(Hed)}$, %	36,2	47,1	31,8	21,7	37,6	38,5	40,8	26,6	47,6	50,5	37,4	37,5
$F'_{ST(W\&C)}$, %*	34,3	43,9	31,2	19,5	39,0	33,8	39,1	28,0	43,9	45,9	36,3	35,1
D_{JOST} , %	26,2	36,5	27,6	14,4	31,1	24,2	33,6	22,2	39,3	37,4	31,7	29,2
D_{CHAO} , %*	24,7	35,8	28,1	14,4	30,7	24,0	32,5	21,4	38,1	37,3	31,7	30,8
D'_a , %	70,1	73,0	85,4	67,0	81,4	64,9	77,7	84,8	78,5	68,3	81,2	76,5
D'_b , %*	33,3	43,8	38,1	22,1	40,1	22,5	39,2	41,8	38,4	34,0	42,0	36,2
D'_γ , %	77,0	81,7	88,4	71,4	86,1	69,9	83,6	88,5	83,9	76,6	86,3	82,1

Примечания. Число аллелей на локус: n_a – фактическое, n_e – эффективное по гетерозиготности, s_{n_e} – эффективное по энтропии. Гетерозиготность: H_o – фактическая, H_e – ожидаемая. Индекс фиксации: $G_{ST(NEI)}$ – по Нею, $F_{ST(W\&C)}$ – по Кокерхэму и Вейру. Показатели дифференциации пород на базе гетерозиготности: $G'_{ST(Hed)}$ и $F'_{ST(W\&C)}$ – скорректированные индексы фиксации, D_{JOST} – по Джосту, D_{CHAO} – по Чао. Энтропийные меры разнообразия по Шеннону/Шервину: D'_a – внутри пород, D'_b – между породами, D'_γ – общее. * переменные, которые формировали Data1r размерностью 11×7 /

Notes. The number of alleles per locus: n_a – actual, n_e – effective in heterozygosity, s_{n_e} – effective in entropy. Heterozygosity: H_o – actual, H_e – expected. Fixation index: $G_{ST(NEI)}$ – by Nei's, $F_{ST(W\&C)}$ – by Cockerham/Weir's. Indicators of interbreed differentiation based on heterozygosity: $G'_{ST(Hed)}$ and $F'_{ST(W\&C)}$ – adjusted fixation indices, D_{JOST} – by Jost's, D_{CHAO} – by Chao's. Entropic measures of diversity according to Shannon/Sherwin's: D'_a – intrabreed, D'_b – between breeds, D'_γ – in combined samples. * variables that formed Data1r with dimension 11×7.

Преобразованные оценки представлены в таблице 2 (Data2). Каждый столбец рассматривался как профиль локуса k по $M = 14$ преобразованным оценкам разнообразия/дифференциации, а каждая строка – как профиль переменной m по $K = 11$ полокусным оценкам.

Внутрилокусный CV p'_{km} -оценок варьировал от 6 до 32 %, в частности, по локусу 7 – 6,0 %, по локусам 1, 5 и 9 – 10-12 %, локусам 2, 4 и 11 – 15-20 %, локусам 3, 6, 8 и 10 – 28-32 %. Усреднённый CV составил 19,5 %, средних по локусам – 11,5 %.

На рисунке 1 представлены кривые (профили) полокусных оценок показателей разнообразия. Так, на рисунке 1, А визуализированы профили показателей аллельного богатства (n_a , n_e и s_{n_e}); кривые – почти идентичны. Высокие значения имели локусы 3 и 8 (в среднем 12,4 %), низкие – локусы 4 и 6 (6,6 %);

CV оценок составил 20-26 %. Схожие кривые, но менее вариативные ($CV = 14$ %), получены для профилей фактической (H_o) и ожидаемой (H_e) гетерозиготности (рис. 1, В).

Кривые профилей индексов фиксации и показателей β -разнообразия на базе гетерозиготности представлены на рисунке 1, С. Выделялась кривая для индексов фиксации (идентичная для $G_{ST(NEI)}$ и $F_{ST(W\&C)}$) из-за высокой вариативности оценок ($CV = 40$ % против 24 %). Имела место некоторая асинхронность с кривыми α -разнообразия (рис. 1, А и 1, В). Так, если максимальные оценки по α -разнообразию получены у локусов 3, 5 и 8, то оценки их индексов фиксации были минимальными. С другой стороны, если по локусам 2, 6 и 10 индексы фиксации были самыми высокими, то оценки их α -разнообразия – самыми низкими. В более полиморфных локусах скорость фиксации аллелей ниже.

Таблица 2 – Преобразованные оценки разнообразия, % (Data2: 11×14) /
Table 2 – Transformed diversity estimates, % (Data2: 11×14)

Variable	Локус / Locus										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
n_a^*	7,4	7,4	12,5	7,4	10,3	7,0	9,7	12,6	9,0	7,0	9,6
n_e	7,3	7,8	12,6	6,5	10,5	5,6	9,9	11,8	10,2	6,7	11,0
$s_{n_e}^*$	7,2	7,7	12,9	7,0	10,6	6,0	9,8	12,2	9,4	6,7	10,6
H_o	9,7	9,3	9,7	7,4	9,7	6,6	9,9	10,3	10,3	7,5	9,6
H_e^*	8,4	8,5	10,7	8,0	9,9	6,7	9,8	10,3	9,5	7,7	10,3
$G_{ST(NEI)}^*$	10,2	12,6	4,3	6,4	7,1	14,4	8,1	4,2	10,4	16,0	6,2
$F_{ST(W\&C)}$	10,5	12,2	4,7	6,4	7,7	13,2	8,9	4,8	10,0	15,1	6,6
$G''_{ST(Hed)}$	8,7	11,3	7,6	5,2	9,0	9,3	9,8	6,4	11,4	12,1	9,0
$F'_{ST(W\&C)}^*$	8,7	11,1	7,9	4,9	9,9	8,6	9,9	7,1	11,1	11,6	9,2
D_{Jost}	8,1	11,3	8,5	4,4	9,6	7,5	10,4	6,8	12,1	11,5	9,8
D_{Chao}^*	7,8	11,2	8,8	4,5	9,6	7,5	10,2	6,7	12,0	11,7	9,9
D'_α	8,4	8,8	10,3	8,0	9,8	7,8	9,3	10,2	9,4	8,2	9,8
D'_β^*	8,4	11,1	9,6	5,6	10,1	5,7	9,9	10,6	9,7	8,6	10,6
D'_γ	8,6	9,1	9,9	8,0	9,6	7,8	9,4	9,9	9,4	8,6	9,7
Mean	8,5	9,9	9,2	6,5	9,5	8,3	9,6	8,8	10,2	10,0	9,3
CV	11,9	17,8	28,3	20,3	10,5	32,4	6,0	31,4	9,8	31,0	14,8

Примечания: Mean – среднее по локусу; CV – коэффициент изменчивости. * переменные, которые формировали **Data2r** размерностью 11×7 (как в **Data1r**) /

Notes: Mean – the mean by locus; CV – the coefficient of variability. * variables that formed a **Data2r** with a dimension of 11×7 (as in **Data1r**).

На рисунке 1, D представлены три кривые, характеризующие вариацию полокусных оценок α -, β - и γ -разнообразия по энтропии. Профили D'_α - и D'_γ -переменных были сильно коррелированы как друг с другом, так и с оценками переменных n_a , n_e , s_{n_e} и H_e . Для D'_β -оценок характерна более высокая вариативность (20,7 % против 8,9 % для D'_α и D'_γ).

Коэффициенты ранговой корреляции Кендалла (τ : tau) между переменными представлены в таблице 3. Из 91 τ -оценки статистически значимыми⁵ по двухвыборочному тесту при доверительной вероятности 95 % было 46 (50,5 %). По множественному тесту с поправкой Бонферрони таковых было 19 (20,9 %),

именно: между оценками α -разнообразия (кроме, H_o и n_a с n_e), индексами фиксации и четырьмя показателями аллельной дифференциации на базе гетерозиготности ($G''_{ST(NEI)}$, $F'_{ST(W\&C)}$, D_{Jost} , D_{Chao} , кроме $G''_{ST(NEI)}$ с D_{Jost} и D_{Chao}). Корреляции шенноновских оценок дифференциации (D'_β) со всеми другими показателями разнообразия были статистически незначимыми; без учёта поправки Бонферрони – значимая только с H_e и D'_γ ($\tau = 0,49$). Шенноновская мера γ -разнообразия положительно, высоко и статистически значимо коррелировала с показателями α -разнообразия и ожидаемой гетерозиготностью (с поправкой Бонферрони), но отрицательно с индексами фиксации (без поправки).

⁵Априорный критический уровень статистической значимости (α) – вероятность ошибиться отказавшись от нулевой гипотезы (H_o). Может быть принят равным 0,001, 0,01, 0,05, 0,1. Обычный 5%-ный критический уровень ($\alpha = 0,05$) указывает, что ошибка в принятом решении возможна в 5 % случаев. Доверительная вероятность ($P = 1 - \alpha$) – надёжность, достоверность оценки. Рассчитанный по исходным данным *достигнутый* уровень статистической значимости есть «*pvalue*». При справедливости H_o $pvalue > \alpha = 0,05$. При $pvalue \leq \alpha = 0,05$ H_o отклоняется (разность средних $\neq 0$, корреляция $\neq 0$, есть влияние фактора и т.п.). Также используют: $pvalue \geq 0,1$ – различие считается не значимым; $0,05 \leq pvalue < 0,1$ – слабозначимым; $0,01 \leq pvalue < 0,05$ – статистически значимым; $0,001 \leq pvalue < 0,01$ – сильнозначимым; $pvalue < 0,001$ – высокозначимым

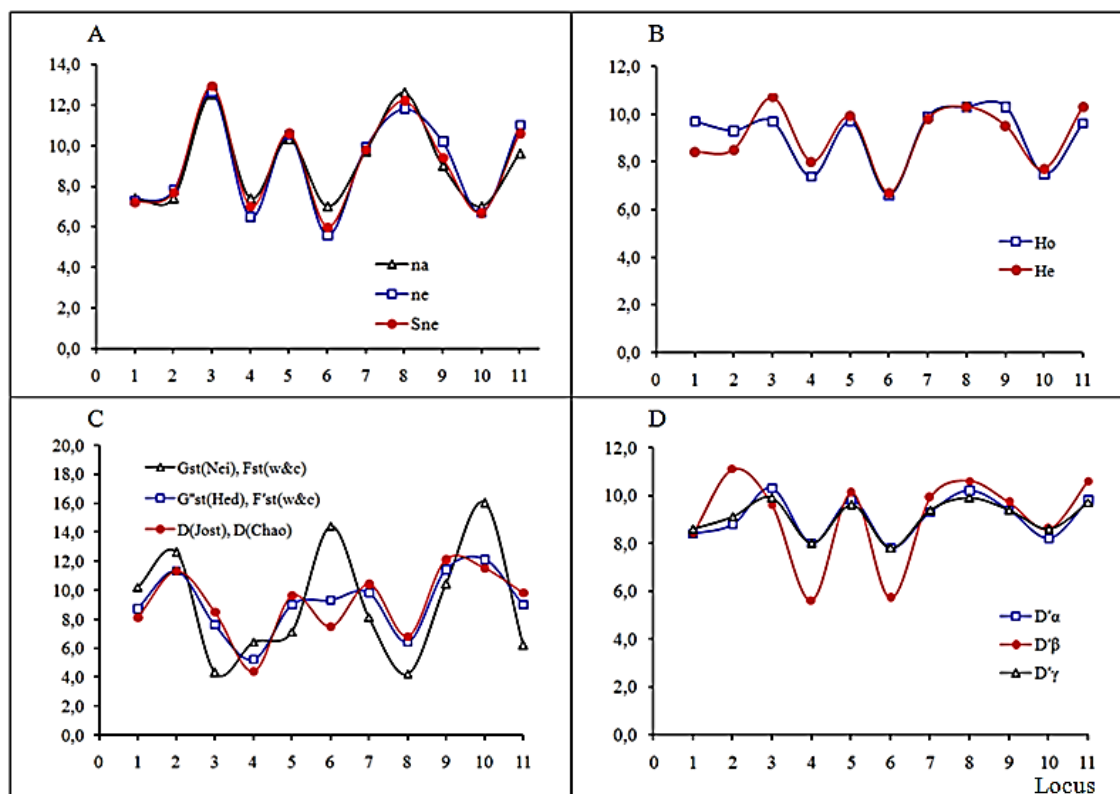


Рис. 1. Профили полюсовых оценок разнообразия/дифференциации (по Data2): А – число аллелей на локус: n_a – фактических, n_e – эффективных по гетерозиготности, S_{ne} – эффективных по энтропии; В – гетерозиготность: H_o – наблюдаемая, H_e – ожидаемая; С – индексы фиксации ($G_{ST(NEI)}$ – по Нейю, $F_{ST(W\&C)}$ – по Кокерхэму и Вейру) и меры дифференциации ($G'_{ST(NEI)}$, $F'_{ST(W\&C)}$, D_{JOST} , D_{CHAO}). D – меры аллельного разнообразия Шеннона/Шервина: D'_a – внутри выборок, D'_b – между выборками, D'_g – общее /

Fig. 1. Locus profiles based on diversity/differentiation estimates (by Data2): Notes. A – the number of alleles per locus: n_a – actual, n_e – effective in heterozygosity, S_{ne} – effective in entropy; B – heterozygosity: H_o – actual, H_e – expected; C – fixation index ($G_{ST(NEI)}$ – by Nei's, $F_{ST(W\&C)}$ – by Cockerham/Weir's) and differentiation measures ($G'_{ST(NEI)}$, $F'_{ST(W\&C)}$, D_{JOST} , D_{CHAO}). D – measures of Shannon/Sherwin's allelic diversity: D'_a – within samples (breeds), D'_b – between samples (breeds), D'_g – total

Дисперсионно-ковариационный анализ.
Для выявления наличия статистически значимых различий между локусами по показателям аллельного разнообразия был проведён ANOVA (ANalysis Of VAriance) по Data2. Результаты тестов Shapiro-Wilk на нормальность распределения и Levene на равенство дисперсий свидетельствовали о невозможности применения параметрического ANOVA. Поэтому был использован непараметрический однофакторный ANOVA [28], в основе которого проверка H_0 о равенстве медиан сравниваемых групп (локусов); альтернативная гипотеза: по крайней мере, одна из медиан отлична от других.

Непараметрический ANOVA отклонил нулевую гипотезу (Test statistic = 40, $p_{value} < 0,000$). Медианный тест Муда (Mood's median test) подтвердил неравенство медиан (Test statistic = 38,8, $p_{value} < 0,000$). Оба критерия позволили выявить наличие различий между профилями показателей разнообразия локусов в целом, но

не указали, между какими из них эти различия были, а между какими – нет.

Наиболее простой способ определения статистической значимости попарных сравнений – визуальный, именно: перекрываются или нет доверительные интервалы медиан на графиках «ящик с усами» (Box-and-Whisker Plot). Эти графики (рис. 2), построенные по Data2, визуализировали описательную статистику по каждому STR-локусу, именно: разброс оценок переменных («усы»), среднее (+) и медиана (горизонтальная линия), 25 и 75 процентиля, определяющие квартильный размах – диапазон вокруг медианы («ящик»), который содержит 50 % оценок. Если интервальные вырезы по бокам «ящиков» двух локусов перекрываются, то различие медиан считается статистически незначимым (например, локусы 2 и 3; $p_{value} > 0,05$) и наоборот (локусы 2 и 4; $p_{value} < 0,05$). Хорошо видна статистическая гомогенность показателей разнообразия локусов 1, 5, 7, 11 и повышенная гетерогенность оценок локусов 8 и 10.

Таблица 3 – τ -корреляции между показателями разнообразия (по Data1)/
Table 3 – τ -correlations between diversity indicators (by Data1)

Variable	n_a	n_e	s_{n_e}	H_o	H_e	$G_{ST(NEI)}$	$F_{ST(WC)}$	$G''_{ST(H)}$	$F'_{ST(WC)}$	D_{Jost}	D_{Chao}	D'_a	D'_β	D'_γ
n_a		0,0009	0,0002	0,0093	0,0003	0,0016	0,0028	0,1245	0,2533	0,4669	0,4669	0,0005	0,1245	0,0005
n_e	0,77		0,0001	0,0122	0,0001	0,0102	0,0064	0,3115	0,5297	0,9380	0,9380	0,0000	0,0516	0,0000
s_{n_e}	0,88	0,92		0,0223	0,0000	0,0047	0,0028	0,2087	0,3831	0,7533	0,7533	0,0001	0,0593	0,0002
H_o	0,61	0,585	0,534		0,0339	0,1693	0,2253	0,8084	0,8704	0,6861	0,6861	0,0076	0,2253	0,0076
H_e	0,84	0,92	0,98	0,49		0,0047	0,0028	0,2087	0,3831	0,8751	0,8751	0,0002	0,0411	0,0002
$G_{ST(NEI)}$	-0,74	-0,60	-0,66	-0,32	-0,66		0,0001	0,0064	0,0184	0,1021	0,1021	0,0158	0,3918	0,0064
$F_{ST(WC)}$	-0,70	-0,64	-0,70	-0,28	-0,70	0,89		0,0102	0,0278	0,1391	0,1391	0,0102	0,4835	0,0102
$G''_{ST(Hed)}$	-0,36	-0,24	-0,29	-0,06	-0,29	0,64	0,60		0,0002	0,0014	0,0014	0,3918	0,6971	0,2429
$F'_{ST(WC)}$	-0,27	-0,15	-0,20	0,04	-0,20	0,55	0,51	0,88		0,0003	0,0003	0,6374	0,3458	0,4321
D_{Jost}	-0,17	0,02	-0,07	0,09	-0,04	0,38	0,35	0,75	0,84		0,0000	0,9380	0,1391	0,9380
D_{Chao}	-0,17	0,02	-0,07	0,09	-0,04	0,38	0,35	0,75	0,84	1,00		0,9380	0,1391	0,9380
D'_a	0,81	0,96	0,92	0,62	0,88	-0,56	-0,60	-0,20	-0,11	-0,02	-0,02		0,0734	0,0001
D'_β	0,36	0,45	0,44	0,28	0,48	-0,20	-0,16	0,09	0,22	0,35	0,35	0,42		0,0356
D'_γ	0,81	0,96	0,88	0,62	0,88	-0,64	-0,60	-0,27	-0,18	-0,02	-0,02	0,93	0,49	

Примечания. Под диагональю – τ -оценки, над диагональю их p_{value} . Затонированы статистически **незначимые** τ -оценки при $\alpha = 0,05$ по двухвыборочному тесту. Полу жирным курсивом выделены статистически **значимые** τ -оценки по множественному тесту при $\alpha_{Bonf} = 0,05/91 = 0,0005$. Здесь и далее $p_{value} = 0,0000$ есть $p_{value} < 0,0001$ /

Notes. Below the diagonal – τ -estimates, above the diagonal of their p_{value} . Gray tone – statistically not significant τ -estimates at $\alpha = 0.05$ on a two-sample test. Statistically significant τ -estimates on the multiple test with $\alpha_{Bonf} = 0,05/91 = 0.0005$ are highlighted in bold. Here and further $p_{value} = 0.0000$ is $p_{value} < 0.0001$ /

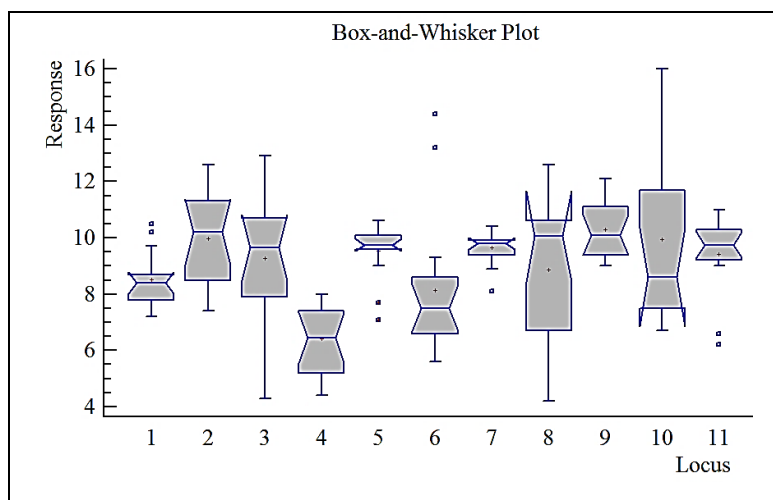


Рис. 2. Графики описательной статистики для 11 STR-локусов /
Fig. 2. Graphs of descriptive Statistics for 11 STR loci

Сравнение графиков «Box-and-Whisker» – это приближенный тест на статистическую значимость различия медиан. Более точную оценку дает непараметрический W-тест Mann-Whitney-Wilcoxon. В таблице 4 представлены уровни статистической значимости (p_{value}) при двухвыборочном (критерий Стьюдента) и множественном (предпочтительно) сравнении медиан локусов. В первом случае критический уровень статистической значимости был традиционный – $\alpha = 0,05$. Во втором случае параметр α был модифицирован по Бонфер-

рони: $\alpha_{Bonf} = 0,05/55 = 0,0009$ (55 – число парных сравнений).

По Стьюденту H_0 отвергалась в 19 случаях (34,5 %), с поправкой Бонферрони – только в 8 случаях (14,5 %). Статистически значимыми были различия медиан локуса 1 с локусами 4 и 9, локуса 4 с локусами 1, 2, 5, 7, 9, 10 и 11.

Коэффициенты τ -корреляций между профилями локусов, рассчитанные по **Data2**, представлены в таблице 5.

Таблица 4 – Уровни достигнутой статистической значимости (p_{value}) различий медиан STR-локусов (по Data2) /
Table 4 – Levels of achieved statistical significance (p_{value}) of differences in median STR-loci (by Data2)

Locus	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1		0,0228	0,1540	0,0002	0,0256	0,0886	0,0057	0,7129	0,0006	0,5345	0,0272
2	0,0228		0,6457	0,0001	0,5196	0,0168	0,7823	0,2600	0,5346	0,7130	0,4481
3	0,1540	0,6457		0,0026	0,8901	0,0934	0,7122	0,7650	0,3458	0,9817	0,8902
4	0,0002	0,0001	0,0026		0,0000	0,0624	0,0000	0,0324	0,0000	0,0007	0,0001
5	0,0256	0,5196	0,8901	0,0000		0,0071	0,9815	0,9816	0,2898	0,8181	1,0000
6	0,0886	0,0168	0,0934	0,0624	0,0071		0,0024	0,4620	0,0016	0,0802	0,0215
7	0,0057	0,7823	0,7122	0,0000	0,9815	0,0024		0,7820	0,1737	0,6287	0,8897
8	0,7129	0,2600	0,7650	0,0324	0,9816	0,4620	0,7820		0,4342	0,4480	0,8902
9	0,0006	0,5346	0,3458	0,0000	0,2898	0,0016	0,1737	0,4342		0,3577	0,2695
10	0,5345	0,7130	0,9817	0,0007	0,8181	0,0802	0,6287	0,4480	0,3577		0,9450
11	0,0272	0,4481	0,8902	0,0001	1,0000	0,0215	0,8897	0,8902	0,2695	0,9450	

Примечания. Над диагональю – двухвыборочный тест Стьюдента ($\alpha = 0,05$), под диагональю – множественный тест Бонферрони ($\alpha_{Bonf} = 0,05/55 = 0,0009$). Затонированы статистически незначимые сравнения /

Notes. Above the diagonal – a two-sample Student's test ($\alpha = 0,05$), below the diagonal – a multiple Bonferroni test ($\alpha_{Bonf} = 0,05/55 = 0,0009$). Gray tone – statistically not significant comparisons.

Таблица 5 – Оценки τ -корреляций между профилями STR-локусов (по Data2) /
Table 5 – Estimates of τ -correlations between STR-loci profiles (by Data2)

Locus	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1		0,0078	0,0014	0,9541	0,0024	0,0039	0,1569	0,0096	0,4254	0,0078	0,0014
2	0,53		0,0000	0,0305	0,0002	0,0085	0,8611	0,0000	0,0049	0,0000	0,0096
3	-0,64	-0,90		0,0911	0,0002	0,0016	0,7293	0,0002	0,0194	0,0000	0,0018
4	-0,01	-0,43	0,34		0,4201	0,8644	0,0207	0,1928	0,0009	0,2103	0,6469
5	-0,61	-0,74	0,75	0,16		0,0010	0,2884	0,0000	0,0876	0,0001	0,0031
6	0,58	0,53	-0,63	-0,03	-0,66		0,0267	0,0006	0,4643	0,0004	0,0001
7	-0,28	0,04	0,07	-0,46	0,21	-0,44		0,5235	0,0300	0,4143	0,0691
8	-0,52	-0,83	0,75	0,26	0,84	-0,69	0,13		0,0290	0,0000	0,0061
9	0,16	0,56	-0,47	-0,67	-0,34	0,15	0,44	-0,44		0,0556	0,5335
10	0,53	0,82	-0,88	-0,25	-0,76	0,71	-0,16	-0,85	0,38		0,0069
11	-0,64	-0,52	0,63	0,09	0,59	-0,77	0,36	0,55	-0,13	-0,54	

Примечания. Под диагональю – τ -оценки; над диагональю – p_{value} при критическом значении $\alpha = 0,05$. Затонированы статистически незначимые значения. Курсивом выделены статистически значимые корреляции при $\alpha_{Bonf} = 0,05/55 = 0,0009$ /

Notes. Under the diagonal – τ -estimates; above the diagonal – p_{value} at critical value $\alpha = 0,05$. Gray tone – statistically not significant τ -values. Italics indicate a statistically significant correlations at $\alpha_{Bonf} = 0,05/55 = 0,0009$

По множественному тесту Бонферрони статистически значимыми было 14 (25,5 %) τ -оценок. Положительные корреляции имели место между локусами 2 и 10, 3 и 5, 3 и 8, 5 и 8, 6 и 10 ($\tau = 0,71-0,84$); отрицательные – локуса 2 с локусами 3, 5 и 8; между локусами 3 и 10, 4 и 9, 5 и 10, локуса 6 с локусами 8 и 11, между локусами 8 и 10 ($\tau = -0,9...-0,67$; при $\tau = -1$ ранги коррелируемых пар располагаются во взаимно обратном порядке).

Анализ главных компонент. Представленные в таблицах 1 и 2 оценки по локусам можно рассматривать как матрицы многомерных наборов данных⁶ типа «объект-переменные» размерностью 11×14 , где объектами являлись 11 локусов, а переменными/признаками – 14 оценок, характеризующие разные аспекты аллельного разнообразия. Следовательно, эти данные можно представить не как массивы чисел (и отдельные одномерные графики (рис. 1)),

⁶Многомерные данные – это набор данных, в котором для каждого объекта (наблюдения) содержится информация о трёх или более его характеристиках (показателях, признаках). Для анализа таких данных используют методы многомерной статистики.

а как векторы в многомерном пространстве. Тогда, набор данных – это облако точек в пространстве большой размерности. Объекты-локусы в 14-мерном пространстве реально невозможно графически отобразить и выявить наличие каких-либо отклонений от случайного рассеивания (закономерности). Для снижения размерности использовали методы многомерной статистики: анализ главных компонент (Principal Components Analysis, **PCA**), неметрическое многомерное шкалирование (Non-metric MultiDimensional Scaling, **nMDS**), кластерный анализ (Cluster Analysis, **CA**).

PCA часто считают формой факторного анализа. Суть PCA в том, чтобы выявить существование скрытых (латентных) факторов или компонент. При этом компоненты строятся в порядке убывания объясняемой ими доли суммарной дисперсии исходных переменных. Это позволяет ограничиться первыми (главными) компонентами («новыми» или «синтетическими» латентными переменными). Главные компоненты определяются как линейные комбинации исходных переменных, некоррелированные друг с другом и захватывающие максимальную долю дисперсии данных. Если исходные переменные коррелируют, то 2-3 главных компонента может быть достаточно для описания большей части общей дисперсии. Процедура PCA исследует связь между переменными, извлекает главные компоненты из имеющегося числа переменных (снижает размерность данных) и проецирует объекты в пространство главных компонент, т. е. определяет ординацию объектов⁷. Кроме того, компонентные оценки (scores), как новые комплексные (интегрированные) переменные, отражающие реальную структуру объектов и наиболее полно передающие исходную информацию (относительно, например, агрегирования путём суммирования), могут быть использованы в иных видах анализов (множественная регрессия, кластерный анализ и др.).

Процедура PCA на начальном этапе создаёт график «каменистой осыпи» (scree-plot), с помощью которого определяют число главных компонент. Такой график по **Data1** представлен на рисунке 3, А. Собственное значение (eigenvalue) – это вклад компоненты в общую изменчивость данных. Вторая точка на рисунке 3, А, где начинается резкий спад

кривой, соответствует числу главных компонент (PC1 и PC2) при условии сохранения максимальной дисперсии. Незначимые компоненты (PC3-PC14) находятся далее на максимально замедленной части кривой (т.н. «щебень»). Собственное значение, деленное на число переменных, отражает долю дисперсии, которая соответствует данной компоненте. Эту долю дисперсии интерпретируют как показатель информативности (мощности) компоненты. Сумма дисперсий по главным компонентам – показатель того, насколько полно выделяемые компоненты представляют анализируемый набор данных (подобие коэффициента детерминации).

Главные компоненты представляют собой линейные комбинации переменных, где «весами» являются «нагрузки» (loading). Компонентная нагрузка (аналог коэффициента корреляции) отражает связь между переменной и компонентой; имеет диапазон [-1; +1]. Чем больше величина нагрузки, тем сильнее связь (влияние) переменной с компонентой (рис. 3, В). Квадрат компонентной нагрузки (аналог частного коэффициента детерминации) интерпретируют как часть дисперсии переменной, объясняемая данной компонентой. Сумма квадратов всех компонентных нагрузок по переменной равна 1 – полной дисперсии переменной. Сумма квадратов всех нагрузок по компоненте (= собственному значению) делённая на число переменных равна доле дисперсии соответствующей компоненты.

Каждой компоненте может быть присвоено имя по переменным с наибольшими нагрузками. На рисунке 3, В видно, что переменные p_a , p_e , s_{p_e} , H_o , H_e , D'_a , D'_γ , характеризующие внутривыборочное аллельное разнообразие, имели большие нагрузки по первой компоненте (PC1). Поэтому PC1 была определена как «альфа-компонента». По PC2 большие нагрузки имели переменные $G''_{ST(HED)}$, $F'_{ST(W\&C)}$, D_{JOST} , D_{CHAO} и D'_β , которые характеризовали разнообразие между выборками (породами). PC2 была названа «бета-компонентой». Выделенные две главные компоненты (PC1 и PC2) или *латентные переменные* (αLV и βLV) были однозначно определены, соотносясь с α - и β -разнообразием, составляющих общее аллельное разнообразие STR-локусов объединённых породных выборок.

⁷Ординация – собирательное понятие для многомерных методов обработки данных. Ординация в узком смысле представляет собой нахождение таких координатных осей на плоскости, относительно которых можно выполнить оптимальное проецирование многомерных анализируемых объектов. Ординация позволяет расположить объекты вдоль некоторых осей, основываясь на значениях переменных, исследовать вариабельность объектов, их близость/отдалённость и наличие структуры, т. е. выделить группы объектов и визуализировать их в 2-3-мерном пространстве. Ординация и классификация (кластеризация) – два метода, которые, в некоторой степени, дополняют друг друга.

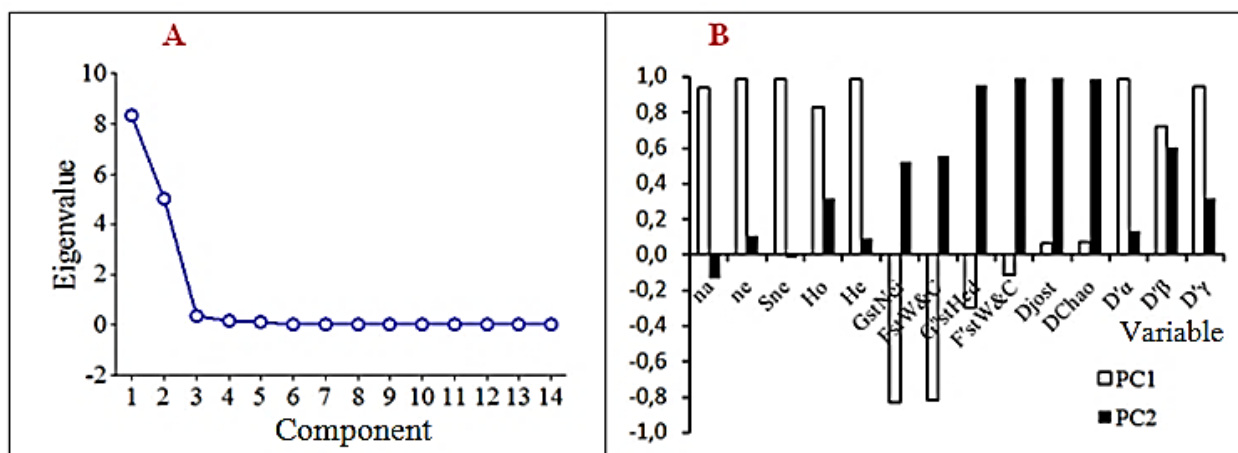


Рис. 3. Графики собственных значений компонент (А) и их нагрузок (В) /
Fig. 3. Graphs of eigenvalues of components (A) and their loads (B)

С помощью программы PCA рассчитали компонентные оценки (координаты локусов в двумерном пространстве) и отобразили в ортогональной системе координат структурные особенности изучаемых 11 STR-локусов в форме графической проекции – ординации (рис. 4, слева).

PC1 объясняла 59,4 % общей дисперсии исходных данных, PC2 – 35,8 %. Суммарная информативность (мощность) PCA составила 95,2 %⁸. Компоненты PC3-PC14, которые были игнорированы, имели вклад в общую дисперсию 4,8 %. Преобразование исходной матрицы данных размерностью 11×14 в матрицу ком-

понентных координат локусов размерностью 11×2 произошло без существенной потери информации. Две латентные переменные характеризовали общую дисперсию почти также хорошо, как исходные 14, но при этом были ортогональны (независимы) друг от друга. Отметим, величина дисперсии, которая объяснялась PC2 (β_{LV}), равная 35,8 %, была близка к сводным оценкам показателей дифференциации породных выборок (табл. 1), особенно к $G''_{ST(HEd)} = 37,5\%$, $F'_{ST(W\&C)} = 35,1\%$ и к шенноновской относительной оценке β -разнообразия – 36,2 %.

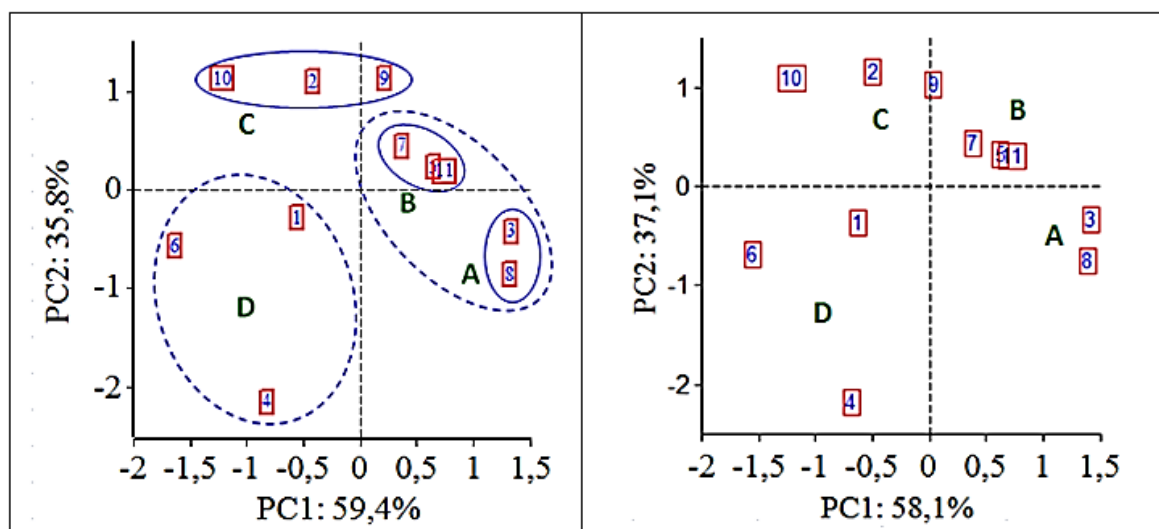


Рис. 4. Ординация STR-локусов в пространстве главных компонент (Слева – PCA по Data1 [11×14], справа – PCA по Data1r [11×7]) /

Fig. 4. Ordination of STR loci in the space of principal components (left – PCA by Data1 [11×14], right – PCA by Data1r [11×7])

⁸PCA считают успешным, если суммарная объяснённая дисперсия (информативность) главных компонент не ниже 70%. Чем меньше информативность компонент, тем менее надёжны компонентные оценки (координаты объектов), тем ниже подтверждение правильности (валидности) ординации.

Аппроксимация с использованием только двух латентных переменных позволила обобщить результаты в виде точечного графика – ординации. На ординации (рис. 4, слева) выделились группы локусов, близкие по координатным оценкам: локусы 3 и 8 – группа А, локусы 5, 11 и 7 – группа В, локусы 10, 2 и 9 – группа С. Локусы условной группы D (4, 6, 1) были удалены как друг от друга, так и от других групп. Поэтому определены как «нетипичные». Локус 6 и особенно 4 подходили под определение «выбросы».

Локусы группы А имели самые высокие значения αLV и ниже среднего βLV ($\alpha^+ \beta^-$). Локусы группы В относились к категории « $\alpha^+ \beta^+$ », а локусы группы С – к « $\alpha^- \beta^+$ ». В группе D локус 1 имел величины LV ниже среднего ($\alpha^- \beta^-$), а локусы 4 и 6 – предельно низкие ($\alpha^- \beta^-$).

PCA с редуцированными данными. Качество, устойчивость ординации (валидность⁹) проверяется, как правило, согласованностью её с таковыми, полученными на иных наборах данных и/или с использованием других методов многомерной статистики.

Набор исходных данных размерностью 11×14 (**Data1**) сократили до размерности 11×7 путём удаления «избыточных» переменных одного типа (**Data1r**). Были оставлены переменные n_a , S_{ne} , H_e , $G_{ST(NED)}$, $F'_{ST(W\&C)}$, D_{CHAO} и D'_b (в табл. 1 и 2 помечены «*»). Три первые характеризовали α -разнообразие, остальные – β -разнообразие. PCA-ординация по **Data1r** представлена на рисунке 4, справа.

Сокращение числа исходных переменных в два раза не отразилось на общей информативности PCAr (95,2 %). Незначительно снизилась дисперсия PC1, но настолько же повысилась дисперсия PC2. Не отразилось сокращение числа переменных и на ординации локусов – также можно было выделить группы А, В, С и D. Для оценки согласованности (сходства) ординаций использовали анализ Прокруста¹⁰ – PROTEST¹¹ [26], который выдает m_{12} -статистику, называемую «дистанцией Прокруста» (чем меньше величина, тем лучше), и вероятность отвержения нулевой гипотезы (статистически значимое соответствие, если

$p_{perm} \leq 0,05$). Приближённую величину сходства (r^2) можно получить из отношения $m_{12} \approx 1 - r^2$ [25]: $r^2 \approx 1 - m_{12}$. PROTEST на основе пермутации компонентных оценок (999 перестановок) показал статистически высокосignificant сходство PCA- и PCAr-ординаций, именно: $m_{12} = 0,0034$, $p_{perm} = 0,0001$; $r^2 = 0,997$.

Неметрическое многомерное шкалирование (nMDS). В контексте проверки устойчивости PCA-ординации был проведён nMDS-анализ, причём по преобразованным полукусным оценкам отобранных переменных (**Data2r**; табл. 2 с «*»). Суть nMDS состоит в нелинейном преобразовании дистанций между объектами. Процедура nMDS пытается как можно точнее представить парные различия между объектами в низкоразмерном пространстве. С помощью алгоритма nMDS рассчитывали дистанции между объектами, присваивали им ранги и размещали в пространстве 2-3-мерной системы координат (шкал) таким образом, чтобы ранги дистанций в результирующей ординации воспроизводились с сохранением порядка исходных значений. Например, если исходная дистанция между объектами 5 и 8 имела ранг 16 (из всех дистанций между любыми двумя объектами), то на графике ординации расстояние между точками 5 и 8 в идеале должно оставаться по-прежнему 16-м по величине.

Критерием качества nMDS-ординации является стресс (stress) – мера отклонения финальной конфигурации объектов от исходных дистанций (в контексте требования рангового соответствия). Алгоритм nMDS направлен на нахождение оценок координат объектов, минимизирующих величину стресса. Ординация при стрессе $\geq 0,3$ считается случайной, 0,2 – плохой, 0,1 – удовлетворительной, 0,05 – хорошей, 0,025 – отличной и 0,000 – идеальной. Дополнительно вычисляется коэффициент R^2 (детерминации), который показывает долю дисперсии исходных различий, учтённую выделенными шкалами (осями; в PCA – компоненты). Чем ближе R^2 к 1, тем полнее данные шкалы воспроизводят исходные различия между объектами.

⁹Валидность – обоснованность и пригодность применения методик и результатов исследования в конкретных условиях. Валидация – процедура, дающая высокую степень уверенности в том, что конкретный процесс, метод или система обладает повторяемостью (воспроизводимостью и устойчивостью).

¹⁰Прокрустов анализ (Procrustes Analysis) – статистический метод, который сравнивает наборы многомерных форм, пытаясь преобразовать их в состояние суперналожения. 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.

¹¹STATGRAPHICS® Centurion XVI User Manual. 2010.

На рисунке 5 слева представлена nMDS-ординация STR-локусов по матрице Gower-дистанций. Под шкалами даны величины R^2 . Их суммарное значение составило $70,4 + 20,6 = 91\%$. Это на 4,2 процентных пункта ниже, чем информативность в двух предыдущих анализах. Значение суммарной R^2 и стресса, равного 0,032, характеризовали качество nMDS-ординации как «достаточно хорошее». График Шепарда (Shepard plot; рис. 5 справа) иллюстрирует

различия между полокусными исходными и порядковыми дистанциями. Расхождения были незначительными, что свидетельствовало о хорошей линейной зависимости (корреляции) и заслуживающем доверия визуализации отношений между локусами. PROTEST-анализ показал высокое соответствие nMDS-ординации с PCA-ординацией по **Data1** ($m_{12} = 0,044$, $p_{perm} = 0,001$; $r^2 = 0,956$).

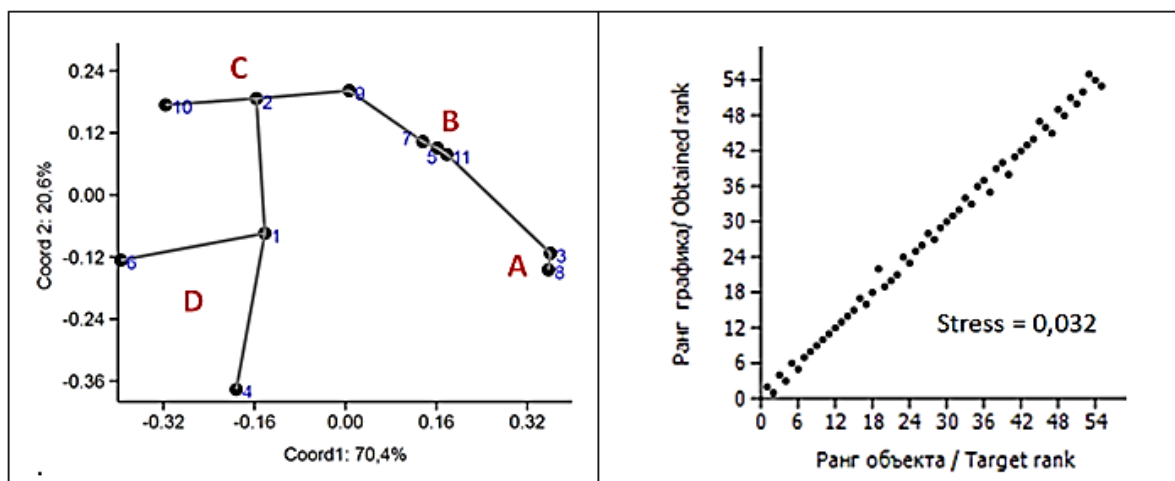


Рис. 5. nMDS-ординация STR-локусов (слева) и график Шепарда (справа) качества подгонки модели (по Data2r) /

Fig. 5. nMDS-ordination STR-loci (left) and Shepard plot (right) of model fit quality (by Data2r)

Вероятные цепочки отношений между локусами визуализировал некорневой граф (рис. 5 слева – линии между точками-локусами), построенный методом «минимального остовного дерева» (Minimum Spanning Tree, MST). MST использовали в качестве вспомогательного средства, способствующего корректной группировке локусов. Последняя (по преобразованным данным) была аналогичной таковой в обоих PCA. Во всех трёх ординациях выделялись «выбросы» – локусы 4 и 6, удалённые от групп A, B и C на значительном расстоянии.

Межлокусные Gower-дистанции. Ординация по nMDS (как и по PCA) – это «пространственная карта» локусов, но без указания расстояний. Близость/удалённость локусов была измерена Gower-дистанцией¹² (d_G), исходя из различий профилей локусов – векторов полокусных оценок (табл. 6).

Значения d_G -оценок находились в диапазоне 0,06-0,74 со средней 0,38. Тест Shapiro-Wilk показал большую вероятность того, что d_G -оценки подчинялись закону нормального

распределения ($W = 0,966$, $p_{value} = 0,118$). При классификации d_G (с величиной класса 0,2) в первую группу с интервалом 0,064-0,194 и средним **0,13** вошло 8 дистанций (14,5 %), во вторую группу (0,223-0,396, **0,29**) – 22 (40 %), в третью (0,402-0,576, **0,51**) – 20 (36,4 %), четвёртую (0,624-0,736, **0,69**) – 5 дистанций (9,1 %). Почти половина d_G -оценок была в диапазоне 0,4-0,7. Похожие результаты наблюдали при использовании метода максимального правдоподобия (модуль Mixture analysis программы PAST3): {G1: $n = 5$ (9,1 %), mean = **0,09**}, {G2: 27 (49,1 %), **0,28**}, {G3: 19 (34,5%), **0,53**} и {G4: 4 (7,3 %), **0,70**}. Между локусами группы В усреднённая дистанция составила 0,08, группы А – 0,12, группы С – 0,22. Между локусом 6 и локусами 2, 5 и 8 дистанции были 0,4, 0,56 и 0,7; локуса 4 с предыдущими – 0,51, 0,55 и 0,5 соответственно. Самая большая дистанция имела место между локусами 8 и 10 – 0,74.

¹²Gower-дистанция измеряет среднее различие по всем переменным, которые нормализованы по рангам каждой переменной: $d_{jk} = (1/n) \sum |x_{jm} - x_{km}| / (\max x_{sm} - \min x_{sm})$, где d_{jk} – дистанция между j и k локусами; n – число переменных; x_{jm} и x_{km} – m -я переменная в j и k локусах; $\max x_{sm}$ и $\min x_{sm}$ – максимальное и минимальное значения m -ой переменной в выборке.

Таблица 6 – Gower-дистанции между профилями STR-локусов (по Data2r) /
Table 6 – Gower-distances between STR-locus profiles (by Data2r)

Locus	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	0,229		-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	0,469	0,570		-	-	-	-	-	-	-	-
4	0,281	0,510	0,624		-	-	-	-	-	-	-
5	0,340	0,333	0,237	0,545		-	-	-	-	-	-
6	0,225	0,396	0,689	0,313	0,564		-	-	-	-	-
7	0,298	0,279	0,291	0,528	0,064	0,523		-	-	-	-
8	0,489	0,576	0,116	0,568	0,269	0,698	0,333		-	-	-
9	0,293	0,190	0,410	0,574	0,194	0,513	0,130	0,463		-	-
10	0,257	0,186	0,678	0,501	0,466	0,289	0,402	0,736	0,284		-
11	0,351	0,336	0,234	0,540	0,077	0,575	0,099	0,240	0,223	0,496	

Разброс локусов по α - и β -оценкам Шеннона/Шервина. Информационно-энтропийным методом Шеннона/Шервина рассчитываются α - и β -показатели, характеризующие аллельное разнообразие внутри и между популяциями. Их выборочные относительные оценки по локусам представлены в таблице 1 (D'_α и D'_β). Было получено рассеяние локусов в двумерной плоскости этих оценок (рис. 6), что соответствовало редукции **Data1** до размерности 11×2.

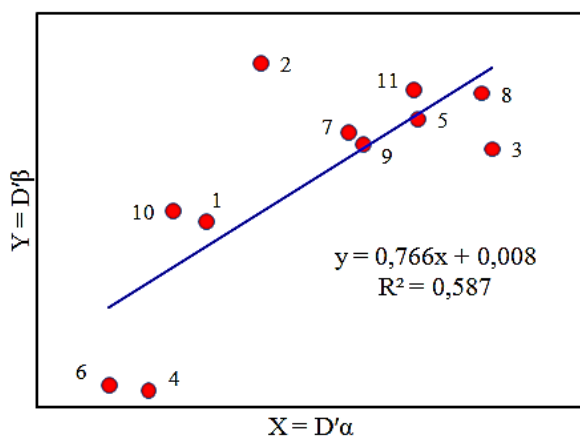


Рис. 6. Разброс локусов на плоскости α - и β -оценок Шеннона/Шервина /
Fig. 6. The spread of loci by the α - and β -estimates of Shannon/Sherwin's

Разброс локусов заметно отличался от таковых в PCA и nMDS ординациях (рис. 4 и 5). PROTEST выявил повышенные величины m_{12} -статистики с ординациями по PCA (0,284) и nMDS (0,221). Это определило r^2 -оценки 0,72 и 0,78 соответственно. Тем не менее согласованность ординаций по шкале Чеддока подхо-

дила под категорию «сильная» и была статистически значимая ($p_{perm} \leq 0,01$).

Имела место парная группировка локусов: 3-8, 5-11, 7-9, 1-10 и 4-6. Две первые пары локусов характеризовались высокими показателями α - и β -разнообразия; в целом, соответствовали группам локусов А и В на ординациях рисунков 4 и 5. Три первые пары, в принципе, можно объединить в одну группу. Локусы двух последних пар характеризовались низкими показателями α и β -разнообразия и демонстрировали существенно бóльшую близость, чем на PCA- и nMDS-ординациях. Лocus 2 находился в стороне от остальных и имел ниже среднего D'_α -оценку и самую высокую D'_β -оценку.

Регрессионный анализ показал статистически значимую связь между оценками переменных D'_α и D'_β ($p_{value} = 0,006$). Имела место тенденция повышения полокусных оценок межпородного разнообразия с увеличением оценок внутривидового разнообразия (в PCA α - и β -латентные переменные были ортогональными). Коэффициент детерминации R^2 (рис. 6) свидетельствовал о том, что линейная модель объясняла 58,7 % вариативности полокусных оценок межпородного разнообразия (D'_β). Коэффициент корреляции, равный 0,766 ($\sqrt{R^2}$), указывал на умеренно сильную взаимосвязь между D'_α и D'_β переменными.

Оценки внутривидового разнообразия (D'_α) являлись производными от числа эффективных аллелей [по энтропии]. Последние были продуктами числа аллелей на locus (n_a) и их распространённости (частоты и выравнивания частот). Проводили регрессионный анализ D'_β

на p_a ; статистика R^2 составила 0,296, тогда $58,7 - 29,6 = 29,1$ % изменчивости оценок D'_B объяснялось распространённостью аллелей. Следовательно, можно полагать, что число аллелей на локус и их распространённость в равной степени оказывали влияние на вариабельность оценок дифференциации породных выборок.

Кластерный анализ (CA). Стандартизированные компонентные оценки по локусам из PCA по **Data1r** были использованы в СА, как новые синтетические некоррелируемые переменные. СА – это процедура упорядочивания объектов (локусов) в сравнительно однородные группы (кластеры) на основе парного сравнения по предварительно определённым и измеренным критериям¹³. Использован алгоритм невзвешенного парно-группового метода с арифметическим усреднением (Unweighted Pair-Group Method using arithmetic Averages – UPGMA), евклидовой метрикой и построением древообразной структуры – дендрограммы, которая визуализировала отношения между локусами.

В UPGMA дистанция между попарно сравниваемыми объектами зависит от наблюдаемых различий по переменным. Пары объектов, между которыми дистанции минимальны, группируются (создают кластер) в первую очередь и оказываются на соседних ветвях дендрограммы. Межкластерная дистанция определяется как среднее всех парных дистанций между членами двух кластеров. Точки ветвления помещаются посередине между двумя объектами или кластерами. Расстояние между двумя объектами является суммой длин ветвей.

Дендрограмма (рис. 7) иллюстрирует последовательность выделения четырёх кластеров: А, В, С и D, состав которых был идентичен группам, полученным в PCA и nMDS (рис. 4, 5). Кофенетическая корреляция, как мера обоснованности дендрограммы [29], была достаточно высокой 0,74¹⁴.

Для оценки адекватности построенного и реального древ используют численный ресэмплинг (метод бутстрэп). Бутстрэп имитирует формирование новых выборок путём повторного выбора (с возвращением) из исходного набора данных. К бутстрэп-выборкам применяли тот же алгоритм, что и к исходному

набору данных. На основании множества бутстрэп-древ определяли выборочные свойства кластеринга. Бутстрэпнинг 999 псевдовыборок показал 100%-ю вероятность объединения в кластер В локусов 5, 7 и 11. Бутстрэп-вероятность объединения локусов 3 и 8 (кластер А) была 73 %. Вероятность кластера С составила 73 %, а кластера D – 47 %.

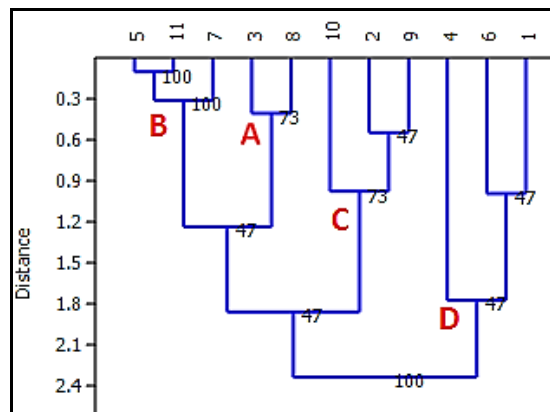


Рис. 7. UPGMA-дендрограмма кластеринга локусов по PCA-оценкам /

Fig. 7. UPGMA-dendrogram of clustering of loci by PCA-scores

Существует эмпирическое правило валидности дендрограммы, именно: устойчивая (достоверная) топология должна сохраняться при изменении метода кластеринга. Например, если результаты иерархического СА на 70 % и более совпадают с группировкой по методу k-средних, то предположение об устойчивости принимается. Расчёты по методу k-средних показали 100%-ное совпадение полученных кластеров.

Сходство локусов с центроидом. В методах ординации «центроид» (центральная точка) – это среднее (взвешенное) положение чего-либо в пространстве ординации, то есть вдоль всех осей ординации одновременно. Для определения центроида использовали вектор сводных оценок показателей разнообразия по всем локусам. Были рассчитаны евклидовы дистанции между локусами и центроидом (d_E) с их последующей стандартизацией (d'_E)¹⁵. Разброс локусов, стандартизированные дистанции и гистограмма сходства ($S = 1 - d'_E$) с центроидом представлены на рисунке 8.

¹³Результатом может быть формирование нескольких кластеров, в каждом из которых содержатся объекты, обнаружившие ранее неизвестные статистически значимые закономерности, взаимосвязи. Последующий анализ кластеров может выявить некоторые объективные характеристики, по которым эти кластеры различаются.

¹⁴Кофенетическая корреляция – оценка соответствия расстояний на дендрограмме расстояниям в исходном многомерном пространстве; насколько хорошо характер отношений (сходство/несходство) между объектами (локусами) представляется дендрограммой.

¹⁵Стандартизация по минимаксной формуле: $d'_E = (d_E - d_{E.min}) / (d_{E.max} - d_{E.min})$, где d_E – евклидова дистанция между локусами; $d_{E.min}$ и $d_{E.max}$ – минимальное и максимальное значения из всех дистанций.

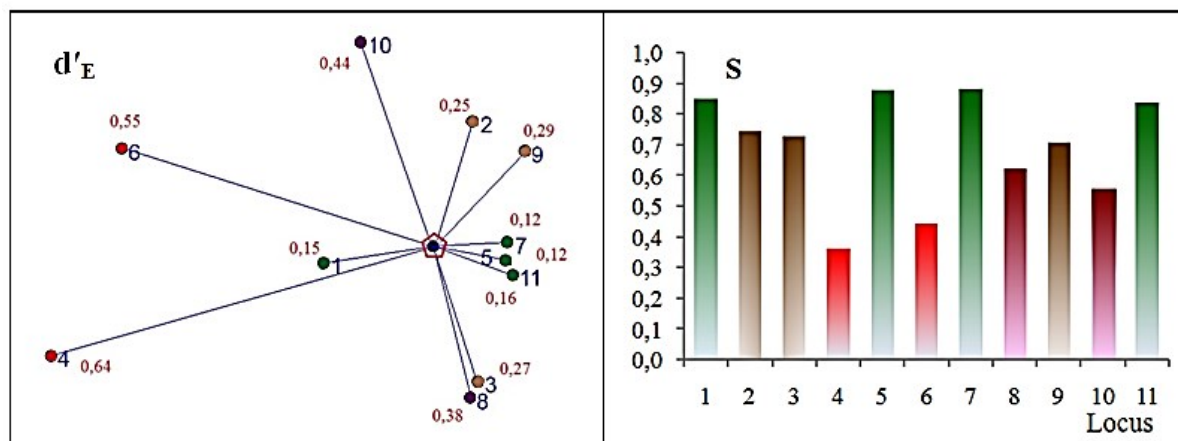


Рис. 8. Дистанции (d'_E) и сходства ($S = 1 - d'_E$) STR-локусов с центроидом /

Fig. 8. Distances (d'_E) and similarities ($S = 1 - d'_E$) of STR-loci with centroid

Локусы 4 и 6 имели показатели сходства с центроидом на уровне 40 %, локусы 8 и 10 – 60 %, локусы 2, 3 и 9 – 70-75 %. Наибольшее сходство с центроидом имели локусы 1, 5, 7 и 11 – $S = 84-88$ %. Можно полагать, что использование только этих четырёх локусов обеспечит получение вектора сводных оценок

разнообразия/дифференциации, близкого к вектору сводных оценок по 11 локусам. Была сделана проверка этого предположения. Дополнительно рассчитаны показатели разнообразия/дифференциации по субвыборке, включающей только 4, 6, 8 и 10 локусы ($S \leq 62$ %). Ниже представлены результаты:

Locus	n_a	s_{ne}	H_e , %	$G_{ST(NEI)}$, %	$F'_{ST(W\&C)}$, %	D_{CHAO} , %	D'_{β} , %
1÷11	5,0	3,7	66	10,3	35,1	30,8	36,2
1,5,7,11 ($S \geq 84$ %)	5,1	3,9	69	10,4	34,8	29,9	38,7
4,6,8,10 ($S \leq 62$ %)	4,7	3,3	59	11,6	31,7	24,3	30,5

Очевидно, что оценки по локусам с $S \geq 84$ % ближе к «истинным» (по 11-ти локусам), чем по локусам с $S \leq 62$ %. В первом случае расхождения были в пределах статистической ошибки – 3,4 % (mean absolute percentage error, MAPE¹⁶). Во втором случае MAPE составила 12,4 %, что можно интерпретировать как статистически значимое отклонение от «истинных» оценок.

γLV -оценки. Альфа- и бета-компонентные оценки локусов (координаты) являлись, как отмечалось, линейными комбинациями исходных мер разнообразия или новыми латентными переменными. Эти переменные, обозначаемые αLV и βLV , были независимыми, отражали реальную структуру взаимосвязей оригинальных переменных и наиболее полно передавали исходную информацию. Их можно сравнить с субиндексами в теории построения селекционных индексов Хендерсона [30], именно: αLV – «субиндекс» интегрированных переменных α -разнообразия, учитывающий переменные β -разнообразия, и βLV – «субиндекс» интегри-

рованных переменных β -разнообразия, учитывающий переменные α -разнообразия. Так как переменные αLV и βLV ортогональны, то обобщённый «индекс» для k -го локуса рассчитывали по уравнению: $\gamma LV_k = (\alpha LV_k + \beta LV_k)/2$ («веса» для «субиндексов» равны 0,5). Получаемая в итоге новая агрегатная переменная (γLV_k) характеризовала k -й локус как *оценщика* тотального показателя разнообразия анализируемой выборки.

По **Data1r** для каждого локуса были рассчитаны γLV -оценки и сопоставлены с локусными оценками γ -разнообразия Шеннона/Шервина (D'_γ)¹⁷. Использовали непараметрический тест Колмогорова-Смирнова, который проверял любые различия распределений, любых параметров, без конкретизации каких именно. Критерий Колмогорова-Смирнова составил $D = 0,36$. Так как $p_{value(asymptotic)} = 0,47 > \alpha = 0,05$, то H_0 не отвергалась – между распределениями D'_γ и γLV не было выявлено никаких различий, разные методы «обработки» привели к практически однородным выборкам оценок.

¹⁶MAPE = $(100 \times \sum |e_i| / \theta^*) / n$, где $e_i = \theta_i - \theta^*$; θ_i – i -ая оценка, θ^* – «истинная» оценка.

¹⁷ D'_γ -оценки были стандартизированы.

Синхронность вариативности полокусных $D'\gamma$ и γLV оценок показана на рисунке 9 слева. Точечная оценка корреляции Пирсона, $r = 0,92$ ($p_{value} = 0,00004$), с вероятностью 95 % находилась в интервале 0,73-0,98. В то же время локусы 4 и 6 подходили под определение «выбросы», что могло повлиять на оценки и результаты проверки H_0 . Ранговая t -корреляция

составила 0,67 (Upper Probability = 0,002 и Lower Probability = 0,998, $p_{value} = 0,005$). Если согласованность совместной изменчивости $D'\gamma$ и γLV оценок была достаточно высокой ($R^2 = 85\%$; рис. 9 справа), то согласованность рангов подходила под категорию «умеренно-заметная». Ранги локусов по двум переменным были:

Locus	3	9	11	5	7	8	2	10	1	6	4
$D'\gamma$ -rank	2	5	3	4	6	1	7	9	8	11	10
γLV -rank	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

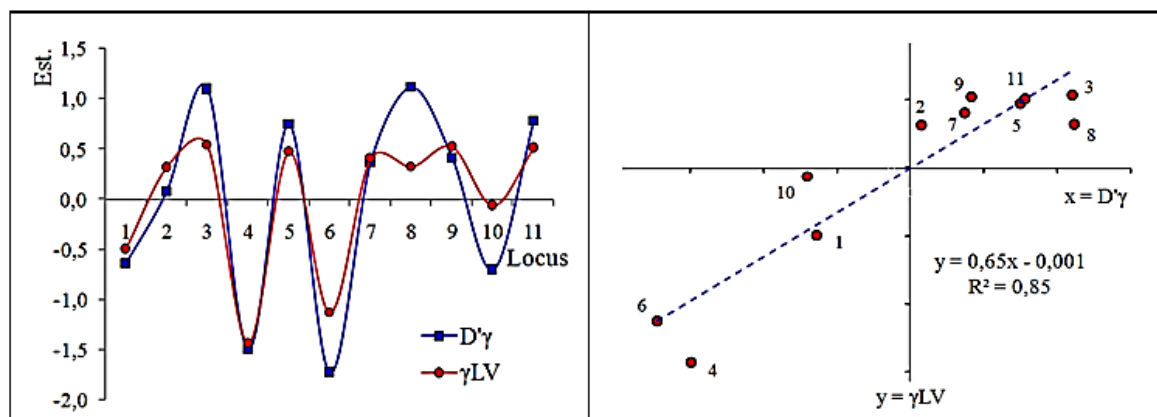


Рис. 9. Рассеяние локусов по $D'\gamma$ и γLV в одномерной (слева) и двумерной (справа) плоскостях /
Fig. 9. Scattering of loci by $D'\gamma$ and γLV in one-dimensional (left) and two-dimensional (right) planes

Подобные ранги имели три локуса (27,3 %), повысили по γLV -переменной – пять (45,4 %), понизили – три (27,3 %). Шесть локусов расходились в рангах на один разряд, локус 9 повысил ранг с 5 до 2, а локус 8 снизил ранг с 1 до 6.

Локус 3, с рангом 1 по γLV , имел максимальные показатели по эффективному числу аллелей (n_e , s_{n_e}), ожидаемой гетерозиготности (H_e), внутривидовому разнообразию Шеннона/Шервина (D'_a), высокие, но не максимальные, показатели межпородной дифференциации и общего разнообразия (D'_b , D'_γ), минимальную величину индекса фиксации (табл. 1). В PCA-ординации локус 3 относился к группе А (рис. 4) и имел соответствие с финальной мультилокусной оценкой 73 % (рис. 8).

Локус 8, лучший по D'_γ (по γLV ранг 6), имел максимальные значения по аллельному богатству (n_a ; высокие по n_e , s_{n_e}), фактической гетерозиготности (H_o ; высокое по H_e), γ -разнообразию Шеннона/Шервина (D'_γ ; высокое по D'_a) и минимальные значения индексов фиксации ($G_{ST(NEI)}$, $F_{ST(W\&C)}$). Как и локус 3 относился к группе А, но его сходство с центроидом составило 63 %.

Локус 4, худший по γLV и D'_γ , имел минимальные показатели по всем мерам меж-

породной дифференциации. По остальным показателям разнообразия величины были близки к минимальным. В PCA-ординации входил в группу «нетипичные» и имел сходство профиля с финальными оценками 36 %.

Закключение. По 11 STR-локусам ДНК 84 генотипированных быков семи пород были рассчитаны 14 показателей, характеризующих разные аспекты аллельного разнообразия объединённой выборки. Оригинальные и стандартизированные оценки сформировали два многомерных набора данных размерностью 11×14 . Используя методы традиционной и многомерной статистики, была сделана попытка найти закономерности рассеяния локусов и получить интегрированный показатель аллельного разнообразия.

Изменчивость стандартизированных оценок разнообразия/дифференциации в пределах локусов находилась в диапазоне 6-32 %. Непараметрический тест Mann-Whitney-Wilcoxon показал статистически значимые ($p_{Bonf} \leq 0,0009$) различия медиан локуса 1 (*Eth3*) с локусом 9 (*Bm2113*), локуса 4 (*Tglal26*) с локусами 1, 2, 5, 7, 9, 10, 11 (*Eth3*, *Inra23*, *Tglal22*, *Eth225*, *Bm2113*, *Bm1824*, *Eth10*). PCA выделил две главные компоненты с общей информативностью 95,2 %. Первая учитывала 59,4 % общей

дисперсии, имела более высокие нагрузки по показателями внутривидового разнообразия и названа «альфа-компонентой». Вторая объясняла 35,8 % общей дисперсии, имела высокие нагрузки по показателям межпородной дифференциации и определена как «бета-компонент». На PCA-ординации локусы 3 и 8 (*Tgla227* и *Tgla53*) формировали группу А, имели высокие величины альфа и ниже среднего бета-компонент. В группу В вошли локусы 5, 7 и 11 (*Tgla122*, *Eth225* и *Eth10*), имевшие выше среднего оценки, как альфа-, так и бета-компонент. Группу С сформировали локусы 2, 9 и 10 (*Inra23*, *Bm2113* и *Bm1824*) с высокими оценками по бета-компоненту. Локусы 1, 4 и 6 (*Eth3*, *Tgla126* и *Sps115*) не относились ни к одной из групп; были определены как «нетипичные» и объединены в условную группу D. Для них были характерны низкие величины, как альфа-, так и бета-компонент. Таким образом, PCA-ординация классифицировала локусы, отразив через реальные взаимосвязи исходных оценок неизвестную до анализа их компонентную структуру (местоположением выделенных групп).

Валидность PCA-ординации подтвердилась расчётами по редуцированным данным

(11×7) и методом pMDS. Согласованность ординаций по тесту Прокруста составила $r^2 = 96\%$ при $p_{perm} = 0,001$. Аналогичная структура локусов была получена кластерным анализом (UPGMA), который определил и бутстрэп-вероятности группировки локусов, близких по латентным переменным: кластера А – 73 %, В – 100 %, С – 73 % и D – 47 %.

Локусы 4 и 6 (*Tgla126* и *Sps115*) имели минимальное сходство с центроидом ($S \approx 40\%$); сходство локусов 8 и 10 (*Tgla53* и *Bm1824*) было на уровне 60 %, локусов 2, 3 и 9 (*Inra23*, *Tgla227* и *Bm2113*) – 70-75 %. Наибольшую близость к центроиду имели локусы 1, 5, 7 и 11 (*Eth3*, *Tgla122*, *Eth225* и *Eth10*) – 84-88 %. Среднее абсолютное отклонение оценок показателей разнообразия/дифференциации по четырём локусам с $S \geq 84\%$ от «истинных» оценок по 11 локусам составило 3,4 % (в пределах статистической ошибки), четырёх локусов с $S \leq 62\%$ – 12,4 % (статистически значимое отклонение). Поэтому локусы *Eth3*, *Tgla122*, *Eth225* и *Eth10* являются, возможно, более подходящими для предварительной декомпозиции аллельного разнообразия и/или каких-либо иных разведочных анализов.

Список литературы

1. Денискова Т. Е., Сермягин А. А., Багиров В. А., Охлопков И. М., Гладырь Е. А., Иванов Р. В., Брем Г., Зиновьева Н. А. Сравнительное исследование информативности STR и SNP маркеров для внутривидовой и межвидовой дифференциации рода *Ovis*. Генетика. 2016;52(1):90-96. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0016675816010021> EDN: VCPJJI
2. Сермягин А. А., Белоус А. А., Контэ А. Ф., Филиппченко А. А., Ермилов А. Н., Янчуков И. Н., Племяшов К. В., Брем Г., Зиновьева Н. А. Валидация геномного прогноза племенной ценности быков-производителей по признакам молочной продуктивности дочерей на примере популяции черно-пестрого и голштинского скота. Сельскохозяйственная биология. 2017;52(6):1148-1156. DOI: <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2017.6.1148rus> EDN: YLSVCC
3. Смарагдов М. Г., Кудинов А. А. Полногеномная оценка инбридинга у молочного скота. Достижения науки и техники АПК. 2019;33(6):51-53. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39179451> EDN: UQDHGE
4. Sermyagin A. A., Dotsev A. V., Gladyr E. A., Traspov A. A., Deniskova T. E., Kostyunina O. V., Reyer H., Wimmers K., Barbato M., Paronyan I. A., Plemyashov K. V., Sölkner J., Popov R. G., Brem G., Zinovieva N. A. Whole-genome SNP analysis elucidates the genetic structure of Russian cattle and its relationship with Eurasian taurine breeds. Genetics Selection Evolution. 2018;50:37. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12711-018-0408-8>
5. Volkova V. V., Abdelmanova A. S., Deniskova T. E., Romanenkova O. S., Khozhokov A. A., Ozdemirov A. A., Sermyagin A. A., Zinovieva N. A. Investigation of the Genetic Diversity of Dagestan Mountain Cattle Using STR-Markers. Diversity. 2022;14(7):569. DOI: <https://doi.org/10.3390/d14070569>
6. Калашникова В. В., Храброва Л. А., Зайцев А. М., Зайцева М. А., Калинкова Л. В. Полиморфизм микросателлитной ДНК у лошадей заводских и локальных пород. Сельскохозяйственная биология. 2011;46(2):41-45.
7. Deniskova T. E., Dotsev A. V., Selionova M. I., Kunz E., Medugorac I., Reyer H., Wimmers K., Barbato M., Traspov A. A., Brem G., Zinovieva N. A. Population structure and genetic diversity of 25 Russian sheep breeds based on whole-genome genotyping. Genetics Selection Evolution. 2018;50:29. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12711-018-0399-5>
8. 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
9. Kharzinova V. R., Dotsev A. V., Solovieva A. D., Shimit L. D.-O., Kochkarev A. P., Reyer H., Zinovieva N. A. Genome-Wide SNP Analysis Reveals the Genetic Diversity and Population Structure of the Domestic Reindeer Population (*Rangifer tarandus*) Inhabiting the Indigenous Tofalar Lands of Southern Siberia. Diversity. 2022;14(11):900. DOI: <https://doi.org/10.3390/d14110900>
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. 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

12. 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>
13. Jost L. GST 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>
14. Chao A., Ma K. H., Hsieh T. C., Chiu C. H. Online Program SpadeR (Species-richness Prediction And Diversity Estimation in R). Program and User's Guide. 2015. URL: http://chao.stat.nthu.edu.tw/wordpress/software_download/
15. 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>
16. 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
17. Кузнецов В. М. Оценка генетической дифференциации популяций молекулярным дисперсионным анализом (аналитический обзор). *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
18. Кузнецов В. М. Информационно-энтропийный подход к анализу генетического разнообразия популяций (аналитический обзор). *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
19. Putman A. I., Carbone I. Challenges in analysis and interpretation of microsatellite data for population genetic studies. *Ecology and Evolution*. 2014;4(22):4399-4428. DOI: <https://doi.org/10.1002/ece3.1305>
20. 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>
21. 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>
22. 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>
23. 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.
24. 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.
25. Jackson D. A. PROTEST: A PROcrustean Randomization TEST of community environment concordance. *Écoscience*. 1995;2(3):297-303. DOI: <https://doi.org/10.1080/11956860.1995.11682297>
26. 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>
27. 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>
28. Kruskal W. H., Wallis W. A. Use of ranks in one-criterion variance analysis. *Journal of the American Statistical Association*. 1952;47(260):583-621. DOI: <https://doi.org/10.2307/2280779>
29. Ким Дж.-О., Мьюллер Ч. У., Клекка У. Р., Олдендерфер М. С., Блэшфилд Р. К. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ. Пер. с англ. Под ред. И. С. Енюкова. М.: «Финансы и статистика», 1989. 215 с.
30. Henderson C. R. Selection index and expected genetic advance. In: «Statistical genetics and plant breeding». Hanson W. D. and Robinson H. F. (eds). NAS-NRS. 1963. Pp.141-163.

References

1. Deniskova T. E., Sermyagin A. A., Bagirov V. A., Okhlopov I. M., Gladyr E. A., Ivanov R. V., Brem G., Zinoveva N. A. Comparative analysis of the effectiveness of str and snp markers for intraspecific and interspecific differentiation of the genus *Ovis*. *Genetika = Russian Journal of Genetics*. 2016;52(1):90-96. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.7868/S0016675816010021>
2. Sermyagin A. A., Belous A. A., Konte A. F., Filipchenko A. A., Ermilov A. N., Yanchukov I. N., Plemyashov K. V., Brem G., Zinoveva N. A. Genomic evaluation of bulls for daughters' milk traits in russian black-and-white and holstein cattle population through the validation procedure. *Sel'skokhozyaystvennaya biologiya = Agricultural Biology*. 2017;52(6):1148-1156. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.15389/agrobiol.2017.6.1148rus>
3. Smaragdov M. G., Kudinov A. A. Full genome inbreeding assessment of dairy cattle. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK = Achievements of Science and Technology of AICis*. 2019;33(6):51-53. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39179451>
4. Sermyagin A. A., Dotsev A. V., Gladyr E. A., Traspov A. A., Deniskova T. E., Kostyunina O. V., Reyer H., Wimmers K., Barbato M., Paronyan I. A., Plemyashov K. V., Sölkner J., Popov R. G., Brem G., Zinovieva N. A. Whole-genome SNP analysis elucidates the genetic structure of Russian cattle and its relationship with Eurasian taurine breeds. *Genetics Selection Evolution*. 2018;50:37. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12711-018-0408-8>
5. Volkova V. V., Abdelmanova A. S., Deniskova T. E., Romanenkova O. S., Khozhokov A. A., Ozdemirov A. A., Sermyagin A. A., Zinovieva N. A. Investigation of the Genetic Diversity of Dagestan Mountain Cattle Using STR-Markers. *Diversity*. 2022;14(7):569. DOI: <https://doi.org/10.3390/d14070569>
6. Kalashnikova V. V., Khrabrova L. A., Zaytsev A. M., Zaytseva M. A., Kalinkova L. V. Polymorphism of microsatellite dna in horses of stud and local breeds. *Sel'skokhozyaystvennaya biologiya = Agricultural Biology*. 2011;46(2):41-45. (In Russ.).
7. Deniskova T. E., Dotsev A. V., Selionova M. I., Kunz E., Medugorac I., Reyer H., Wimmers K., Barbato M., Traspov A. A., Brem G., Zinovieva N. A. Population structure and genetic diversity of 25 Russian sheep breeds based on whole-genome genotyping. *Genetics Selection Evolution*. 2018;50:29. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12711-018-0399-5>

8. Kharzinova V. R., Zinovieva N. A. The pattern of genetic diversity of different breeds of pigs based on microsatellite analysis. *Vavilovskiy zhurnal genetiki i seleksii* = Vavilov Journal of Genetics and Breeding. 2020;24(7):747-754. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18699/VJ20.669>
9. Kharzinova V. R., Dotsev A. V., Solovieva A. D., Shimit L. D.-O., Kochkarev A. P., Reyer H., Zinovieva N. A. Genome-Wide SNP Analysis Reveals the Genetic Diversity and Population Structure of the Domestic Reindeer Population (*Rangifer tarandus*) Inhabiting the Indigenous Tofalar Lands of Southern Siberia. *Diversity*. 2022;14(11):900. DOI: <https://doi.org/10.3390/d14110900>
10. 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>
11. 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.prodanimbio.2020.1.91-110>
12. 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>
13. Jost L. GST 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>
14. Chao A., Ma K. H., Hsieh T. C., Chiu C. H. Online Program SpadeR (Species-richnessPrediction And Diversity Estimation in R). Program and User's Guide. 2015. URL: http://chao.stat.nthu.edu.tw/wordpress/software_download/
15. 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>
16. 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>
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>
18. 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>
19. Putman A. I., Carbone I. Challenges in analysis and interpretation of microsatellite data for population genetic studies. *Ecology and Evolution*. 2014;4(22):4399-4428. DOI: <https://doi.org/10.1002/ece3.1305>
20. 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>
21. 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>
22. 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>
23. 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.
24. Camúñez L. E. M., Roca C. F., Tornero R. Guía de *KyPlot*: Programa de análisis de datos en contexto científico. Facultad de Física-Universitat de València (UEV). 2008. 33 p.
25. Jackson D. A. PROTEST: A PROcrustean Randomization TEST of community environment concordance. *Ecoscience*. 1995;2(3):297-303. DOI: <https://doi.org/10.1080/11956860.1995.11682297>
26. 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>
27. Dray S., Chessel D., Thioulouse J. Procrustean co-inertia analysis for the linking of multivariate datasets. *Ecoscience*. 2003;10(1):110-119. DOI: <https://doi.org/10.1080/11956860.2003.11682757>
28. Kruskal W. H., Wallis W. A. Use of ranks in one-criterion variance analysis. *Journal of the American Statistical Association*. 1952;47(260):583-621. DOI: <https://doi.org/10.2307/2280779>
29. Kim Dzh.-O., M'yuller Ch. U., Klekka U. R., Oldenderfer M. S., Bleshfild R. K. Factorial, discriminant and cluster analysis. *Per. s angl. Pod red. I. S. Enyukova*. Moscow: «Finansy i statistika», 1989. 215 p.
30. Henderson C. R. Selection index and expected genetic advance. In: «Statistical genetics and plant breeding». Hanson W. D. and Robinson H. F. (eds). NAS-NRS. 1963. Pp.141-163.

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