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

Аграрная наука Евро-Северо-Востока

AGRICULTURAL SCIENCE EURO-NORTH-EAST

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

Том 25
№ 1
2024

Vol. 25
No. 1
2024

Аграрная наука Евро-Северо-Востока

Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka

Научный журнал основан в 2000 г. **Том 25, № 1, 2024**

Периодичность 6 раз в год Префикс DOI: 10.30766

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

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

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

Регистрационный номер ПИ №ФС77-72290 от 01.02.2018 г.

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

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

Рубрики журнала:

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

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License

(cc) BY

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

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

Ответственные секретари: Соболева Наталия Николаевна, инженер по НТИ научно-организационного отдела ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока, г. Киров, Россия,
Агалакова Татьяна Владимировна – к.б.н., старший научный сотрудник лаборатории ветеринарной иммунологии, ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока, г. Киров, Россия

Редакционный совет

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

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

Журнал включен в базы данных РИНЦ, ВИНИТИ, 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; ЭНСХБ: http://www.cnshb.ru/elbib.shtm; CYBERLENINKA: https://cyberleninka.ru; журнала: http://www.agronauka-sv.ru

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

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

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

www. agronauka-sv.ru

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

Техническая редакция,
верстка И. В. Кодочигова

Макет обложки
Н. Н. Соболева

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

Подписано к печати
26.02.2024
Дата выхода в свет
04.03.2024
Формат 60x84$^{1/8}$.
Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 17,67.
Тираж 100 экз. Заказ 2.
Свободная цена

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

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

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

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

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

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

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

Цой Юрий Алексеевич — д.т.н., профессор, чл.-корр. РАН, главный научный сотрудник ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», г. Москва, Россия

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Редакционная коллегия

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

Артемьев Андрей Александрович — д.с.-х.н., доцент, ведущий научный сотрудник, 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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Agricultural Science Euro-North-East, 2024;25(1)

Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka

Peer-reviewed scientific journal was established in 2000

The journal is published six times per year. DOI: 10.30766

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

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

Registration number
PI №FS 77-72290 01 Feb 2018

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

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

Headings

- REVIEWS
- ORIGINAL SCIENTIFIC ARTICLES

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

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

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 Nighny Novgorod State Agrotechnological University, Nizhny Novgorod, Russia
Dmitriy A. Ivanov	Dr. of Sci. (Agricultural), professor, corresponding member of RAS, chief researcher of the All-Russian Institute of Reclaimed Lands – Branch of the Federal Research Centre V. V. Dokuchaev Soil Science Institute, Tver, Russia
Petr P. Kazakevich	Dr. of Sci. (Engineering), the professor, corresponding member of Belarus NAS, Deputy Chairman of Presidium of Belarus NAS, a foreign member of RAS, Minsk, Republic of Belarus
Vladimir M. Kosolapov	Dr. of Sci. (Agricultural), the professor, academician of RAS, the Academic advisor of the Federal Williams Research Center of Forage Production and Agroecologi, Moscow, Russia
Aleksandr I. Kostjaev	Dr. of Sci. (Economics), professor, academician of RAS, chief researcher, Chief of the Department of Economic and Social Problems of the Development of Regional Agro-Industrial Complex and Rural Territories the Institute of Agricultural Economics and Rural Development, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia
Ivan M. Kulikov	Dr. of Sci. (Economics) professor, academician of RAS, 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 Nighny Novgorod State Agrotechnological University, Nizhny Novgorod, Russia

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

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

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

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

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

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

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

www. agronauka-sv.ru

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

Technical edition, layout
Irina V. Kodochigova

Cover layout
Natalia N. Soboleva

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

Passed for printing
26.02.2024
Date of publication
04.03.2024
Format 60x84$^{1/8}$. Offset paper.
Cond. pecs. l. 17,67.
Circulation 100 copies. Order 2.
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, Nighny Novgorod State Agrotechnological University, Nizhny Novgorod, Russia

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

СТРАНИЦЫ ИСТОРИИ

Н. А. Уланов, А. Н. Уланов
Исторические и экологические аспекты гидромелиоративных исследований на Кировской лугоболотной опытной станции (*к 105-летию образования станции*)……. 7

ОБЗОРНЫЕ СТАТЬИ

С. Ш. Спицына, О. А. Бурова, П. А. Андриянов, П. А. Журилов, Е. А. Лискова, О. И. Захарова, А. И. Тютрина, Д. Д. Кашина, Н. А. Гребнев, В. Н. Качан, И. В. Яшин, А. А. Блохин
Злокачественная катаральная горячка: патогенез, проблемы профилактики и контроля (обзор)…….. 18

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

РАСТЕНИЕВОДСТВО

О. В. Левакова
Новые источники селекционно-ценных признаков ячменя ярового для условий южной зоны Центрального региона РФ…….. 27

Т. А. Барковская, О. В. Гладышева
Адаптивные свойства и экологическая пластичность перспективных линий яровой мягкой пшеницы в условиях Центрального Нечерноземья России……. 35

ЗАЩИТА РАСТЕНИЙ

А. М. Шпанев
Засоренность посевов люпина узколистного в зернотравянопропашном севообороте на Северо-Западе России…….. 43

Т. С. Антонова, Н. М. Арасланова, М. В. Ивебор, С. Л. Саукова
Изменчивость заразихи, паразитирующей на подсолнечнике, при интенсивном его возделывании в регионах Российской Федерации…… 53

ЗЕМЛЕДЕЛИЕ, АГРОХИМИЯ, МЕЛИОРАЦИЯ

Ю. И. Митрофанов, Н. К. Первушина
Динамика гумуса в полевых севооборотах на осушаемых землях…… 62

ЗООТЕХНИЯ

Н. А. Худякова, И. С. Кожевникова, Е. Н. Щипакова, А. А. Кондакова, М. С. Калмыкова
Частота встречаемости генотипов k-казеина и их влияние на молочную продуктивность коров холмогорской породы…….. 75

Н. С. Алтухова, И. Н. Янчуков, А. В. Савинов, Ю. А. Иванов
Взаимосвязь между оценкой племенной ценности быков-производителей палево-пестрой популяции скота на разном уровне управления селекцией…… 82

ВЕТЕРИНАРНАЯ МЕДИЦИНА

Л. Л. Фомина, Д. И. Березина, Т. С. Кулакова, К. Э. Моданова
Зависимость коагуляционной активности крови коров *in vitro* от температуры…….. 90

МЕХАНИЗАЦИЯ, ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ, АВТОМАТИЗАЦИЯ

А. С. Дорохов, А. Г. Аксенов, А. В. Сибирёв, М. А. Мосяков, Н. В. Сазонов
Обоснование инновационной технологии сортофитопрочистки в селекционно-семеноводческих посадках картофеля и овощных культур…… 98

З. А. Годжаев, С. Е. Сенькевич, И. С. Алексеев, Е. Н. Ильченко
Математическое моделирование динамических процессов сельскохозяйственного мобильного энергетического средства на электроприводе…….. 112

С. Ю. Булатов, А. Н. Пронин
Результаты исследований шнекового дозатора сухих сыпучих компонентов комбикорма…… 123

А. А. Рубцов, Д. А. Немущенко
Подбор мешалки и оптимизация процесса перемешивания субстрата в ферментере биогазовой установки…….. 134

ЮБИЛЕИ

Юнусову Губейдулле Сибяттуловичу – 80 лет!..... 151

Вацлаву Романюку – 85 лет!..... 152

CONTENTS

PAGES OF HISTORY

Nikolay A. Ulanov, Anatoly N. Ulanov
Historical and ecological aspects of hydro-reclamation research at the Kirov Meadow-Swamp Experimental Station…….. 7

REVIEWS

Svetlana Sh. Spitsyna, Olga A. Burova, Pavel A. Andriyanov, Pavel A. Zhurilov, Elena A. Liskova, Olga I. Zakharova, Anastasia I. Tutrina, Daria D. Kashina, Nikita A. Grebnev, Vladislav N. Kachan, Ivan V. Yashin, Andrey A. Blokhin
Malignant catarrhal fever: pathogenesis, problems of prevention and control (review)…….. 18

ORIGINAL SCIENTIFIC ARTICLES

PLANT GROWING

Olga V. Levakova
New sources of agronomic traits of spring barley for the conditions of the southern zone of the Central region of the Russian Federation…….. 27

Tatyana A. Barkovskaya, Olga V. Gladysheva
Adaptive properties and ecological plasticity of promising lines of spring soft wheat in the conditions of the Central Non-Black Earth Regions of Russia…… 35

PLANT PROTECTION

Alexander M. Shpanev
Weed infestation of narrow-leaved lupine crops in grain-grass-rowed crop rotation in the North-West of Russia…… 43

Tatyana S. Antonova, Nina M. Araslanova, Maria V. Iwebor, Svetlana L. Saukova
Variability of broomrape parasitizing on sunflower during its intensive cultivation in the regions of the Russian Federation…….. 53

AGRICULTURE, AGROCHEMISTRY, LAND IMPROVEMENT

Yuri I. Mitrofanov, Natalja K. Pervushina
Dynamics of humus in field crop rotations on drained lands……. 62

ZOOTECHNY

Natalia A. Khudyakova, Irina S. Kozhevnikova, Ekaterina N. Shchipakova, Alena A. Kondakova, Maria S. Kalmykova
Frequency of occurrence of k-casein genotypes and their effect on the milk productivity of Kholmogory cows……. 75

Natalia S. Altukhova, Ivan N. Yanchukov, Anton V. Savinov, Yuri A. Ivanov
Relationship between evaluations of sires in pale-motley cattle population at different levels of management…….. 82

VETERINARY MEDICINE

Lyubov' L. Fomina, Dar'ya I. Berezina, Tat'yana S. Kulakova, Karina E. Modanova
Dependence of blood coagulation activity on temperature in cows *in vitro*…….. 90

MECHANIZATION, ELECTRIFICATION, AUTOMATION

Aleksey S. Dorokhov, Alexander G. Aksenov, Aleksey V. Sibirev, Maksim A. Mosyakov, Nikolai V. Sazonov
Justification of innovative technology for variety and phytocleaning in breeding and seed plantings of potatoes and vegetable crops……. 98

Zakhid A. Godzhaev, Sergey E. Senkevich, Ilya S. Alekseev, Ekaterina N. Ilchenko
Mathematical modeling of dynamic processes of agricultural mobile energy vehicles on an electric drive…. 112

Sergey Yu. Bulatov, Alexey N. Pronin
Research results of the screw dispenser of dry bulk feed components…….. 123

Aleksandr A. Rubcov, Dmitriy A. Nemuschenko
Selecting a stirrer and optimizing the process of mixing the substrate in the fermenter of biogas unit…… 134

JUBILEE

Jubilee G.S. Yunusov – 80 years!..... 151

Jubilee V. Romanyuk – 85 years!..... 152

https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.1.7-17
УДК 631.432:631.615:631.62:631.674

Исторические и экологические аспекты гидромелиоративных исследований на Кировской лугоболотной опытной станции

(*к 105-летию образования станции*)

© 2024. Н. А. Уланов[1, 2], А. Н. Уланов[1, 2]✉

[1]*ФГБОУ ВО «Вятский государственный агротехнологический университет», г. Киров, Кировская обл., Российская Федерация,*

[2]*Кировская лугоболотная опытная станция – филиал ФГБНУ «Федеральный научный центр кормопроизводства и агроэкологии имени В. Р. Вильямса», п. Юбилейный, Оричевский р-н, Кировская обл., Российская Федерация*

В статье представлена история зарождения и развития гидромодульных исследований на Кировской лугоболотной опытной станции, их практическое воплощение и экологическое значение при разработке принципов щадящей, почвозащитной и средообразующей системы земледелия на органических почвах в условиях Северо-Востока европейской части РФ. Основным объектом многолетних исследований служил типичный низинный торфомассив «Гадовское», расположенный на территории Котельничской торфяной базы Кировской области. Особое внимание уделяется поиску наиболее эффективных способов регулирования водного режима осушаемых болот, используемых в кормопроизводстве. Установлено, что наиболее оперативным, результативным и экологически безопасным является метод шлюзования, когда дополнительная влага к корнеобитаемому слою подается снизу. Показан наиболее оптимальный диапазон режима грунтовых вод для однолетних и многолетних кормовых трав. Представлена корреляционная зависимость урожайности от степени осушения торфяной залежи. Существенный вклад в мелиоративную науку внесли гидромодульные исследования на выработанных торфяниках Кировской области. На торфомассивах «Гадовское», «Зенгинское», «Бахтинское», «Пищальское» и других изучали химический состав грунтовых и сбросных болотных вод, установлена взаимосвязь водно-физических свойств и водного режима остаточной залежи с пищевым и температурным режимами, а также с коэффициентом водопотребления растений и несущей способностью выработанной почвы. Агроэкологический мониторинг выработанных торфяников, находящихся в культуре более 40–60 лет, показал, что в процессе эксплуатации этих объектов происходит постепенное снижение их продуктивности, обусловленное понижением общего агрофона, частичным и даже полным нарушением гидрологических функций осушительной сети. Чтобы окончательно не потерять эти антропогенные образования из сферы культурного природопользования, необходим, прежде всего, периодический ремонт всей осушительной системы. Дальнейшая перестройка внутри ландшафтной оболочки позволит сконструировать принципиально новые постболотные лесолуговые агроэкосистемы, где могут быть предусмотрены иные альтернативные кормопроизводству направления (охотничье-промысловое, лесохозяйственное, ягодно-лекарственное, грибное и др.).

Ключевые слова: *торфяные и выработанные почвы, водный режим, способы регулирования, открытая и закрытая осушительная сеть, биохимическая сработка торфа, пожароопасность, продуктивность культур, удобрения, агроэкологический мониторинг, грунтовые воды*

Благодарности: работа выполнена без финансового обеспечения в рамках инициативной тематики.
Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Уланов Н. А., Уланов А. Н. Исторические и экологические аспекты гидромелиоративных исследований на Кировской лугоболотной опытной станции (к 105-летию образования станции). Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2024;25(1):7–17. DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.1.7-17

Поступила: 19.09.2023 Принята к публикации: 15.01.2024 Опубликована онлайн: 28.02.2024

Historical and ecological aspects of hydro-reclamation research at the Kirov Meadow-Swamp Experimental Station

(*to the 105th anniversary of the Station's formation*)

© 2024. Nikolay A. Ulanov[1, 2], Anatoly N. Ulanov [1, 2]✉

[1]Vyatka State Agrotechnological University, Kirov, Russian Federation

[2]Kirov Meadow-Swamp Experimental Station – branch Federal Williams Research Center of Forage Production & Agroecology, Kirov, Russian Federation

The article presents the history of the origin and development of hydromodule research at the Kirov Meadow-Swamp Experimental Station, their practical implementation and ecological significance in the development of the principles of a saving, soil-protective and environment-forming system of agriculture on organic soils in the conditions of the North-East of the European part of the Russian Federation. The main object of long-term research is a typical lowland peatland «Gadovskoye», located on the territory of the Kotelnich peat base of the Kirov region. Special attention is paid to the search for the most effective ways to regulate the water regime of drained swamps used in feed production. It has been established that the most operational, efficient and environmentally friendly method is sluicing, when additional moisture is supplied to the root layer from below. The most optimal range of groundwater regime for annual and perennial forage grasses is shown. The correlation dependence of yield on the degree of drainage of peat deposits is presented. A significant contribution to the reclamation science was made by hydromodule studies on the cutover bogs of the Kirov region. The chemical composition of groundwater and waste swamp waters has been studied on the «Gadovskoye», «Zenginskoye», «Bakhtinskoye», «Pishchalskoye» peatlands, and others, the relationship of the water-physical properties and water regime of the residual deposit with food and temperature regimes, as well as with the coefficient of water consumption of plants and the bearing capacity of the soil of cutover bogs has been established. Agroecological monitoring of the developed peatlands, which have been in culture for more than 40−60 years, shows that during the operation of these facilities there is a gradual decrease in their productivity, due to a decrease in the total agricultural background, partial and even complete violation of the hydrological functions of the drainage network. In order not to completely lose these anthropogenic formations from the sphere of cultural nature management, it is necessary, first of all, periodic repairs of the entire drainage system. Further restructuring within the landscape shell will make it possible to construct fundamentally new post-swamp forest-meadow agroecosystems, where other alternative fields to forage production (hunting, forestry activity, berry-officinal, mushroom, etc.) can be provided.

Keywords: *peat and developed soils, water regime, methods of regulation, open and closed drainage network, biochemical response of peat, fire hazard, crop productivity, fertilizers, agroecological monitoring, groundwater*

Acknowledgement: the work was done without financial support in the framework of the initiative topics.
The authors thanks the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

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

For citations: Ulanov N. A., Ulanov A. N. Historical and ecological aspects of hydro-reclamation research at the Kirov Meadow-Swamp Experimental Station (to the 105th anniversary of the Station's formation). *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2024;25(1):7–17. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.1.7-17

Received: 19.09.2023 Accepted for publication: 15.01.2024 Published online: 28.02.2024

В мае 2023 года исполнилось 105 лет со дня основания Кировской лугоболотной опытной станции (филиал ФНЦ «ВИК им. В. Р. Вильямса»). Независимо от ведомственной принадлежности станции, основным направлением исследований является разработка научных основ кормопроизводства в условиях осушенных торфяников и систем кормления КРС. Однако приоритетным направлением все эти годы было изучение гидрологических особенностей осушаемых болот с целью эффективного управления их водным режимом.

При освоении болотных образований под промышленную торфодобычу или нужды мелиоративного земледелия первоочередной задачей является разовый сброс вековых запасов болотных вод в ближайший водоприемник. Согласно Водному кодексу РФ, болото, как гидрологический объект, на 85–97 % состоящий из воды, относится к водным объектам. Особенность этого природного объекта в том, что более 80 % этих запасов воды не подчиняются закону гравитации, а прочно удерживаются молекулярными и капиллярными силами торфа [1]. Известный болотовед-гидролог А. Д. Дубах, отмечая двоякую особенность болота: «гидрологически торфяное болото есть, несомненно, водоем, эксплуатационно – несомненно, суша», огромное значение придавал именно последнему его состоянию [2]. Даже после незначительного сброса «лишней» воды принципиально меняется экологическое предназначение болота, многократно возрастает хозяйственное значение обнажившегося торфяного месторождения. Из инертного объекта, слабо реагирующего на изменения климатических условий, осушаемое болото, используемое в дальнейшем в качестве почвы, стано-

вится в огромной степени зависящим от деятельности человека и климатических особенностей региона, где оно образовалось.

Степень воздействия на природный гидрологический режим болота зависит от его будущего хозяйственного назначения. Так, при использовании торфяного месторождения, как объекта промышленной торфодобычи, главной задачей является предупреждение загораний торфа. В условиях незащищенности «торфяного тела» растительностью высокая его пожароопасность дело частое и обычное [1, 3]. Поэтому степень осушения здесь соизмеряется с несущей способностью торфяной залежи, обеспечивающей безопасное передвижение механизмов и машин, участвующих в технологии торфоизвлечения. Обычно для низинных типов залежи уровень грунтовых вод (УГВ) не рекомендуют опускать ниже 20–30 см. В случае переосушки, возврат воды из водоприемников обратно на территорию торфодобычи практикуют через систему водоперекачивающих станций. При использовании осушаемого болота в сельскохозяйственном или лесном производстве норма осушения диктуется биологическими требованиями возделываемых культур и она, как правило, значительно выше [1].

Вся история Кировской лугоболотной опытной станции неразрывно связана с использованием осушаемых болот под кормовые, овощные, технические, а в последствие и под лесные культуры. Осушение торфомассива «Гадовское» – основного объекта исследований, было начато в 1918 году. Сравнительно хороший уклон поверхности болота и наличие низко расположенного водоприемника – р. Быстрица, благоприятствовало проведению осушительных работ и давало возможность снизить уровень почвенно-грунтовых вод на требуемую для растений глубину [4].

Первый канал длиной 1,5 км был выполнен вручную жителями близлежащей д. Ключи. В дальнейшем каналы прокладывали на расстоянии 50−60 м друг от друга. Из-за отсутствия спецмашин работы по осушению велись крайне медленно. Тем не менее, во второй половине 20-х годов начались исследования по изучению влияния УГВ на различные виды сельскохозяйственных культур [5, 6]. В 1932 году на базе Вятской опытно-мелиоративной станции создали «Гидромодульный отдел», что позволило на юго-восточной части торфомассива осуществить серию исследований по изучению способов первичного осушения болот. Первые опыты по определению эффективности жердяного дренажа, заложенного на глубину 1 м через 21, 32, 45, 64 и 80 м, проводили на одном из пастбищных участков. Было установлено, что с увеличением частоты расположения дренажа грунтовые воды опускались на 7−15 см [7]. Уже тогда, в период с 1932 по 1940 год, было отмечено, что односторонний сброс болотных вод в отдельные годы приводит к жесткому дефициту влаги и снижает урожайность многолетних трав, особенно во второй период вегетации.

В конце 40-х годов, когда станция входила в состав Всесоюзного НИИ болотного хозяйства (г. Минск), проводились первые опыты по регулированию водного режима путем дождевания и шлюзования. На пастбищном травостое изучали оросительную норму 500 м^3/га (при двукратном поливе норма 250 м^3/га). Наибольший эффект от этого приема (урожайность в 1,5−1,7 раза выше по отношению к контролю без орошения) был получен при сочетании полива и полной дозы минеральных удобрений $N_{45}P_{30}K_{60}$ [7]. Спустя многие годы, к приему дождевания вернулись вновь. Так, в исключительно засушливых условиях 1972−1974 гг. эффективность полива проверяли на пастбищном травостое, который использовался в режиме трех циклов стравливания [8]. Полив осуществляли после второго стравливания дальнеструйной установкой ДДН-70 нормой 300 м^3/га и на фоне азотного удобрения в дозе 60 кг/га д. в. В результате полива урожайность трав увеличилась, в зависимости от слоя торфа, в 2,5−5,5 раза. Кроме этого, орошение позволило более равномерно распределить зеленую фитомассу по циклам стравливания: 30:34:36 %. Следует отметить, что глубина промачивания почвы, даже при двукратном поливе, не превышала 8−14 см. При поливе торфяной почвы необходимо учитывать одно обстоятельство − при подаче воды сверху происходит резкое увеличение биохимической сработки торфяной залежи. А этот процесс, согласно концепции щадящего земледелия, необходимо максимально сдерживать. Водобалансовые наблюдения показали, что при поливе в жаркую ветреную погоду значительная часть поливной воды (до 20−30 %) испаряется. Особенно часто непродуктивные

потери воды отмечали на старосеянных задернелых участках с пересохшим верхним слоем профиля. В конце 60-х – начале 70-х годов в целях эффективного использования минеральных удобрений и увеличения количества стравливаний травосмеси была организована система орошения всей территории долголетнего культурного пастбища (ДКП) − 160 га. Применяли короткоструйные установки «Волжанка», была построена вся необходимая инфраструктура: водопроводы, насосная станция, для водоснабжения на базе магистрального канала возле старого поселения работников станции (р. Чернушка) был выкопан пруд с максимальной глубиной 2,5–3,0 м. К сожалению, все это просуществовало недолго. Выяснилось, что для обеспечения пастбищных трав необходимым количеством влаги вполне достаточно ее зимне-весенних запасов в почве, а эксплуатация самой системы оказалась очень затратной. В течение 2-3 лет всё оборудование было демонтировано, так и не окупившись.

Альтернативным и не менее эффективным способом регулирования водного режима осушенных торфяников является шлюзование. Система шлюзов обеспечивает сброс избытка воды в весенний период, что позволяет проводить полевые работы в оптимальные сроки (обработка почвы, посев, начало выпаса и другие). В период формирования урожая шлюзование позволяет поддерживать оптимальный УГВ для разных культур. Первую серию опытов по шлюзованию пастбищ проводили И. А. Лобанов, М. М. Карчевский, А. Г. Трестман в конце 30-х годов прошлого столетия [9, 10, 11]. Использовались весьма примитивные самодельные задвижки в деревянном исполнении, однако и эти устройства обеспечивали прибавку урожая на 17−21 % пастбищной травосмеси, кг/га: полевица белая (10), овсяница луговая (15), овсяница красная (15), клевер белый (15), тимофеевка луговая (15), мятлик луговой (30). В 1973 году попытки регулировать водный режим путем шлюзования глубоко осушенных участков (УГВ – 300 см) были предприняты Н. П. Фоминых. Впервые в условиях торфяных почв была изучена оперативность работы шлюза, т. е. время полного заполнения водой регулируемого участка, которое составило 8–10 дней, УГВ при этом удалось поднять на 90–100 см.

Изучение эффективности закрытого дренажа было продолжено в 50–60-е годы на участках невыработанной части торфомассива «Гадовское» с разной степенью осушения и оторфованности. Помимо жердяного дренажа, изучали действие фашинного, кротового, щелевого, дощатого, каменного, гончарного и других. В разные годы в этом направлении работали М. Я. Лапицкий, Д. И. Козлов (1948−1952 гг.), А. И. Федоров (1952 г.), А. А. Исполинов (1950−1955 гг.), Ф. В. Игнатенок (1953−1955 гг.). Способы регулирования водного режима путем закрытого дренажа, кроме торфомассива «Гадовское», изучались и успешно применялись на торфомассивах «Чашково» и «Бахтинское» Кировской области. Наибольшее практическое применение получил кротовый дренаж. Технологию регулирования поверхностного стока путем кротового дренажа впервые применили в колхозе «Прогресс» на Ключевском болоте [12]. Использовали дренажно-кротовый плуг ДКН-2 с дренами диаметром 5 и 8 см и расширителями диаметром 10 и 15 см на тяге с трактором С-80. Расстояние между дренами 10−20 м, глубина заложения – 60 см. В результате на этом участке (15 га) был получен неплохой для того времени урожай сена многолетних трав (6,6 т/га), озимой ржи (2,1 т/га), овса и ячменя (2,6 т/га). Продолжительность полезного последействия прослеживалась в зависимости от ботанического состава торфа на протяжении 2–5 лет. К сожалению, этот прием невозможен на травянисто-древесной залежи из-за большого количества погребенной древесины.

Огромное внимание уделялось гончарному дренажу, как наиболее перспективному на тот момент виду. Ведущим специалистом по изучению этого способа регулирования водного режима был Ф. В. Игнатенок, работавший в 1955−1958 гг. директором станции. Филипп Васильевич лично руководил всеми гидромодульными исследованиями. Он изобрел, испытал и внедрил в производство бестраншейный дреноукладчик, который, после усовершенствования в 1958−1962 гг., успешно применяли при осушении пойменных лугов Кировской области.

В 1968−1972 гг. проводили исследования по изучению эффективности еще одного вида закрытого дренажа – пластмассового. В качестве объекта был выбран переувлажненный участок, используемый под пастбище и сенокос. Дрены закладывали на глубину 1,0 и 1,5 м через расстояние 15, 30, 45 и 60 м. В наибольшей степени оптимизации агрофи-

зических показателей почвы (температура, влажность, аэрация) и формированию травостоев способствовало междренное расстояние 45 и 60 м. Так, урожайность пастбищной смеси с доминированием лисохвоста лугового в среднем за 5 лет увеличилась с 5,4 (в контроле) до 6,6 т/га сухого вещества (СВ) (на регулируемом участке). Понижение УГВ с 87 до 128 см способствовало повышению урожайности укосного травостоя с 6,2 до 7,7 т/га СВ [7, 8, 13]. К сожалению, спустя 50 лет значительная часть дрен была забита торфяным илом и оксидами Fe^{3+}, что существенно снизило их работоспособность.

Особая тема в истории гидромелиоративных работ станции – это идея глубокого осушения болот посредством строительства редкой сети (через 500 м) глубоких каналов (2-3 м), врезанных в минеральное дно торфяной залежи. Предложение было сделано ведущим специалистом в области теории осушения болот профессором А. Д. Брудастовым, эвакуированным в 1941 году на станцию с группой сотрудников отдела осушения Всесоюзного НИИ гидротехники и мелиорации (ВНИИГиМ). Отведение болотных вод в водоприемник осуществляли в то время частой сетью (через 100 м) мелких (0,8-0,9 м) каналов. В этой связи в период 1941−1955 гг. А. А. Исполиновым и В. С. Станкевичем под общим административным руководством и непосредственном участии Я. Я. Бергмана, М. Я. Лапицкого, Д. И. Козлова, А. И. Федорова проводилась сравнительная оценка глубокого и мелкого способов осушения юго-восточной части торфомассива «Гадовское». Необходимо помнить, что станция в этот период организационно входила в состав ВНИИГиМ, поэтому в научном плане все капитальные работы по переустройству осушительной сети проводились под контролем ученых этого института и лично А. Д. Брудастова. В ходе рекультивации частая сеть мелких осушителей была ликвидирована, нарезаны новые более глубокие (до 2,0−2,5 м) магистральные каналы, очищены от затопления устья жердяного дренажа, проведено углубление с выравниванием необходимого уклона основного водособирателя – р. Чернушки. В результате увеличился размер производственных полей, дополнительное осушение проблемных переувлажненных участков позволило в более ранние сроки проводить весенне-полевые работы, на 15−30 % увеличилась урожайность однолетних и многолетних кормовых культур, особенно травосмесей с доминированием костреца безостого и других корневищных трав.

Исследования по оценке действия и последействия глубокого и мелкого осушения продолжались в разные периоды А. И. Федоровым, Н. И. Чирикиным, Е. Л. Журавлевой, В. М. Мамаевым [7]. Были поставлены уточняющие задачи: установить степень влияния на урожай положения грунтовых вод, их экологически безопасный диапазон, наиболее оптимальный для трав интервал среднесуточных температур воздуха и другие. Анализ 11-летних наблюдений за кострецовым лугом показал, что в разные годы при одном и том же положении УГВ величина урожайности непостоянна. Криволинейная зависимость показывает, что максимальный урожай (9,8 т/га СВ) за два укоса получили при УГВ – 130 см, при более низких и высоких значениях УГВ урожай сена резко снижался. Данные корреляционного отношения указывают на достаточную функциональную зависимость урожая от УГВ. Однако индекс детерминации показал, что только 44 % варьирования показателей урожайности сена костреца безостого обусловлено варьированием УГВ, а 56 % – другими факторами. Кроме того, данные корреляционного отношения указывали на достаточно высокую функциональную зависимость урожая сена костреца безостого от температуры воздуха. Наибольшие урожаи были получены при среднесуточной температуре в пределах 12,7−13,5 ºС [7]. Многолетние наблюдения позволили рекомендовать степень осушения для некоторых культур, возделываемых на торфяных почвах. Так, для яровых зерновых (пшеница, овес, ячмень) средний за вегетацию УГВ должен составлять 100−110 см, озимых зерновых (рожь, пшеница) – 110−120 см, овощей и корнеплодов – 120−140 см, кукурузы – 130−150 см, укосных многолетних трав – 90−110 см, пастбищных трав – 120−130 см.

Анализ результатов сравнительной оценки глубокого и мелкого способов осушения показал, что на первых этапах осушительных работ создается видимость явного преимущества работы глубоких каналов, врезанных в песчаное дно болота. В очень стремительном режиме производится односторонний сброс болотных вод на всей осушаемой территории

массива, тем обеспечиваются достаточно высокие прибавки урожая кормовых культур, особенно в периоды с обильными осадками. Однако негативные последствия глубокого осушения для самой торфяной залежи проявились значительно позднее. Так, на одном из участков (10-е поле), осушаемом с 40-х годов каналом глубиной 2,5−3,0 м, длительное стояние грунтовых вод за отметкой ниже 2,0 м привело к необратимой биохимической деградации всего профиля залежи. Бóльшую часть вегетационного периода влажность корнеобитаемого слоя здесь, за редким исключением, не поднималась выше уровня влажности разрыва капилляров (ВРК). Более того, на глубине 70−80 см, куда не проникала влага осадков и отсутствует капиллярная связь с грунтовыми водами, образовалась углеподобная битумообразная торфяная прослойка, разрывающая влагообмен между горизонтами в границах всей торфяной залежи. В структуре многолетних севооборотов на этом участке почти половину занимали однолетние культуры, включая пропашные. Частая обработка почвы на фоне глубокого осушения привела к значительной фракционной перестройке и лавинообразной минерализации органического вещества (ОВ) торфа, спровоцировала эрозионные процессы. За 80 лет пребывания участка в культуре мощность торфяного слоя на нем уменьшилась на 1,2-1,5 м [14, 15].

С начала 70-х годов происходит активное освоение сотрудниками станции выработанных торфяников на торфомассивах «Пищальское», «Гадовское», «Зенгинское», «Бахтинское», «Ключевское» и других. Изучаются различные системы удобрения, дается экологическая оценка видов и сортов новых кормовых культур, их кормовой и семенной продуктивности, создаются многоцелевые укосные травостои, разрабатывается технология первичного освоения и дальнейшего использования этих объектов в кормопроизводстве, производится почвенно-мелиоративное и агрохимическое обследование практически всех выработанных болот Кировской области на предмет их пригодности в народном хозяйстве. Было установлено, что результативность этих работ и технологий напрямую зависит от гидрологической обстановки и возможности управлять водным режимом этих объектов.

В 1973−1985 гг. на торфомассивах «Гадовское» и «Зенгинское» проводили серию опытов по изучению влияния УГВ и остаточного слоя торфа на водный, воздушный, температурный и пищевой режимы выработанных торфяников [8, 15]. Многолетними наблюдениями на разных объектах установлено, что на выработанных торфяниках водный режим зависит от сочетания трех основных факторов: биологических особенностей культур, слоя остаточного торфа и УГВ. С увеличением слоя торфа от 0 до 120 см в 2,5−3,0 раза возрастают влагозапасы и уменьшаются их колебания в течение сезона. Наиболее благоприятный водный режим формируется на участках со слоем торфа 50−100 см и средним УГВ 70−90 см, наиболее жесткий складывается на торфянисто-глеевых (торф 0−30 см) и полностью сработанных участках. В зависимости от слоя торфа, УГВ и метеоусловий, одновременно в пределах одного массива могут создаваться различные типы водного режима: от периодически десуктивно-выпотного торфяного до периодически промывного [14, 15].

Большое значение для развития теории водопотребления многолетних трав имели лизиметрические исследования. Были изучены основные элементы водного баланса под луговой укосной культурой на выработанной почве с разной степенью осушения и оторфованности, установлен коэффициент водопотребления, изучены размеры потерь элементов питания с фильтрационными водами, определена потребность в дополнительном орошении [8].

В производственных условиях в рамках одного из кормовых севооборотов в 1987−1991 гг. проводились первые опыты по определению ионного состава грунтовых и сбросных вод, величины потерь элементов питания с дренажным стоком. Установлено, что в химическом составе сбросных вод доминирует Ca^{2+} (60−74 мг/л), далее идет Mg^{2+} (14−47 мг/л), NO_3^- (5−50 мг/л), P_2O_5 (0,01−0,07 мг/л). Общая степень минерализации грунтовых вод выше, чем сбросных. В обоих случаях болотные воды по составу характеризуются как гидрокарбонатно-кальциевые [7, 15].

При проведении механизированных работ в условиях гидроморфных почв очень часто возникает проблема их крайне низкой несущей способности, особенно на слабо осушенных участках. Поэтому при проведении полевых работ, без учета этого обстоятельства, образуются глубокие технологические колеи, а также разрушается дернина даже старовоз-

растных травостоев, ухудшается микрорельеф. В 1990−1994 гг. проводились исследования по выявлению степени разрушающего и уплотняющего действия движителей на профиль и дернину участков разной степени осушения, а также влиянию этого фактора на урожайность травостоев. Было установлено, что для снижения негативного воздействия на дернину и урожай старовозрастного травостоя тимофеевки луговой необходимо соблюдать следующие максимально допустимые уровни удельного давления: при УГВ 60−80 см в течение вегетационного периода эта величина должна быть не больше 150 кПа при двух и четырех проходах движителей и 200 кПа при двух проходах; при УГВ 100−120 см – 150−200 кПа при двух проходах [16].

К концу 70-х годов промышленная добыча торфа на многих торфомассивах центральной части Кировской области находилась в стадии завершения. В соответствии с государственной программой рекультивации антропогенно нарушенных ландшафтов, на некоторых выработанных торфяных месторождениях области после реконструкции осушительной сети была построена система двустороннего регулирования водного режима путем оборудования ковшовых затворов переливного типа. Аналогичная система в начале 80-х годов была построена и на выработанных торфяниках торфомассива «Гадовское», на полях последней очереди освоения. Кроме того, в соответствии с проектом «Дальние просторы», в границах всего севооборота №5 научно-производственного стационара предусматривалось строительство с полным набором всех существующих способов регулирования водного режима, включая орошение и закрытый дренаж. Был построен железобетонный оросительный пруд, водопроводы, скважины для обеспечения поливной водой, лабораторный корпус, помещения для насосной станции, энергетических установок и прочая инфраструктура. К сожалению, многие из этих намерений до конца не были реализованы. Все постройки, скважины, водопроводы и оросительные установки со временем были демонтированы. Остались отдельные шлюзы и участки с закрытым дренажем.

Спустя 40 лет, к идее двустороннего регулирования водного режима станция вернулась вновь. За основу были взяты сохранившиеся и исправно работающие шлюзы одного из кормовых севооборотов проекта «Дальние просторы». Здесь следует отметить, что указанный проект был разработан институтом «Кировгипроводхоз» более 40 лет назад для территории, недавно вышедшей из-под торфодобычи, т. е. пребывающей в начальной стадии освоения. Согласно технической документации, система двустороннего регулирования водного режима предусматривала высокий эффект и быструю окупаемость затрат. Однако ни научного, ни производственного подтверждения этих расчетных ожиданий за все эти годы не было зафиксировано.

Чтобы проверить задекларированную в начале 80-х годов работоспособность системы шлюзования в ее современном состоянии, начиная с 2013 года, в рамках специальной программы проводили научно-производственный опыт по изучению ее эффективности в условиях старопахотных выработанных торфяников. Подконтрольная зашлюзованная территория – 90 га. Было установлено: 1. КПД шлюзования составляет всего 60−65 %. 2. Полная гидростатическая стабильность водного режима после закрытия шлюза достигается за 9−11 дней, после открытия шлюза – за 4-5 дней. 3. Эффективность шлюзования находится в прямой зависимости от количества осадков и вида культур. Кроме того, установлено, что эффективность удобрительных средств значительно выше при оптимальной влажности почвы. Регулирование водного режима, позволило: на 20−30 % снизить минерализацию органического вещества торфа; на 20−35 дней увеличить продолжительность периода с оптимальной влажностью почвенного профиля; снизить интенсивность поздневесенних и раннеосенних заморозков, а также пожароопасность производственных полей; уменьшить глубину промерзания почвы и ускорить полное оттаивание на 1,5−2,0 недели. К основным факторам, снижающим эффективность и оперативность шлюзования, необходимо отнести огромную, проявившуюся со временем, пестроту агрофизических свойств почвенного покрова, невыровненность рельефа и большую внутрипочвенную инерцию сопротивления движущейся влаги [17].

Таким образом, вся вековая история освоения и сельскохозяйственного использования торфяных и выработанных почв торфомассива «Гадовское» и аналогичных ему объектов базируется на эффективном управ-

лении водным и пищевым режимами, на их умелом сочетании. Потенциал всех агроприемов (сорт, система удобрения, технология обработки и др.) в конечном итоге напрямую зависит от состояния водно-воздушного режима.

В отношении современного состояния гидрологической обстановки торфомассива «Гадовское» ситуация выглядит следующим образом. Территория невыработанной его части, площадью 450 га (севооборот №2), освоение которой началось более 100 лет назад, пребывает в крайне критическом положении. В допустимо работающем режиме, осуществляя круглогодичный сброс дренажных вод, работают лишь два магистральных канала: один, вырытый в 1919 году вручную (р. Чернушка), другой – глубокий (3-4 м), врезанный в подстилающую породу, выполняющий пограничную роль между землями станции и торфодобывающим предприятием «Оричевское» (канал №5). Из картовых каналов-собирателей со своими функциями по максимуму справляются три канала, отводящих сбросные воды с пастбищных участков. Остальные внутренние осушители, особенно примыкающие к молочно-товарным фермам, а также нагорно-ловчая сеть, практически не функционируют. Как результат, около половины невыработанной части торфомассива постоянно переувлажнены.

Состояние осушительной сети на выработанных торфяниках зависит от давности их освоения. Наиболее сложная ситуация на территории первой очереди освоения, начавшегося в середине 60-х годов (севооборот №3). За это время откосы и русло каналов частично разрушились и практически все заросли древесно-кустарниковой растительностью. Многие внутренние каналы не имеют необходимого уклона, поэтому гидрологически не связаны между собой. В условно работающем состоянии находятся один канал-собиратель и два магистральных канала, непосредственно связанных с водоприемником (р. Быстрица). Из-за большого количества строительного материала стремительно размножаются популяции бобров, усложняя ситуацию. На выработанных участках более позднего срока освоения («Дальние просторы»), в результате частичной реконструкции, гидрологическая обстановка более благоприятная. Значительная часть каналов здесь также заросла древесно-кустарниковой растительностью, откосы отдельных каналов разрушены, однако, в целом, осушительная сеть оперативно осуществляет весенне-летний сброс дренажных болотных вод. Кроме того, имеется возможность восстановить систему шлюзов на этих объектах. В работающем состоянии гончарный дренаж, заложенный в 80-е годы.

Существует общая для выработанных торфяников проблема – это быстрая биохимическая сработка остаточной залежи при любом режиме ее сельскохозяйственного использования. В результате неравномерной сработки и всхолмленного характера болотного дна, разница в минимальных и максимальных отметках поверхности достигает 4 м, т. е. микрорельеф приобретает форму мезорельефа. Как уже было отмечено, это обстоятельство значительно снижает эффективность управления водным режимом путем шлюзования. На контакте торфяного слоя и подстилающей его минеральной породы в анаэробных условиях практически всегда формируется оглеенный горизонт, мощностью 10−15 см, который приближаясь к корнеобитаемой зоне профиля или выходя на поверхность, в силу низкой водопроницаемости способствует созданию локально застойного водного режима в разных местах производственных полей. По причине низкой несущей способности, эти участки выводятся из пашни и очень быстро зарастают мелколесьем. Ежегодно их количество увеличивается, более того, по этой же причине полностью зарастают целые поля. В итоге качественно меняется структура ландшафта, его кормовая продуктивность, биосферная и экологическая роль [17].

Заключение. В сложившихся обстоятельствах торфяные и выработанные почвы продолжают быть основным средством производства в деятельности Кировской лугоболотной опытной станции – филиале Федерального научного центра кормопроизводства и агроэкологии имени В. Р. Вильямса. Агроэкологический мониторинг показал, что без восстановления гидромелиоративных функций и кардинальной перестройки системы удобрения эти природные объекты уже не смогут, как прежде, быть полноценным источником энергонасыщенных кормов. В этой связи возникает естественный вопрос: какие еще альтернативные ресурсы, кроме кормовых, можно получать в создавшихся условиях на этих постболотных лесолуговых агроландшафтах? Зарубежный и отечественный опыт показывает, что у нарушенных торфодобывающей промышленностью болотных экосистем имеется много заслужи-

вающих внимания перспектив в плане их дальнейшего применения. В соответствии с международным проектом «Восстановление торфяных болот в России в целях предотвращения пожаров и смягчения изменений климата» (2011–2018 гг.) выработанные торфяники предлагается повсеместно затопить. В настоящее время проект реализуется в восьми регионах РФ [18]. В этих условиях «экологического обводнения» на некоторых объектах возникает новое активно развивающееся направление – болотное (мокрое) растениеводство [19]. Мы считаем, что такой однозначный подход экологически оправдан лишь в отношении бесхозных объектов, где поддерживать оптимальный водный режим экономически нецелесообразно. Выработанные земли, где пока еще удается управлять водным и пищевым режимами, можно успешно использовать под вторичные хвойно-лиственные древостои и для получения так называемых непроизводственных биологических ресурсов (ягодных, лекарственных, грибных, охотничье-промысловых, кормовых и др.) [20, 21, 22, 23, 24]. Опыт станции показывает, что такой комплексный подход к использованию выработанных торфяников позволяет увеличить общую их биологическую продуктивность в 1,5–2,0 раза.

Список литературы

1. Маслов Б. С. От водного объекта к болотной земле. Болота и биосфера: мат-лы IX Международной школы молодых ученых. Владимир, 2015. С. 93–108.

2. Дубах А. Д. Гидрология болот. М.: Гидрометеоиздат, 1944. 228 с.

3. Козлова В. А., Ахметьева Н. П., Михайлов А. В. Химический состав природного и пиролизного торфа. Болота и биосфера: мат-лы IX Международной школы молодых ученых. Владимир, 2015. С. 209–213.

4. Торфяной фонд Кировской области по состоянию разведанности на 1 января 1969 г. М., 1970. 499 с.

5. Якимов В. П. Сельскохозяйственное использование болот Кировской области. Киров: Кировское обл. изд-во, 1942. 101 с.

6. Летковский С. Т. Луговодство и агротехника зерновых культур на торфяниках. Киров: Краев. изд-во (тип. Местпрома), 1936. 72 с.

7. Чирикин Н. И. Опыт освоения торфяников под культурные пастбища. Гидротехника и мелиорация. 1972;(2):15–19.

8. Зверков Ю. В. Вторая жизнь торфяников. Киров: Волго-Вят. кн. изд-во: Киров. отд-ние, 1982. 80 с.

9. Игнатенок Ф. В. Закрытый дренаж почв. Киров: Кн. изд-во, 1955. 85 с.

10. Игнатенок Ф. В. Закрытый дренаж почв. М.: Колос, 1965. 200 с.

11. Игнатенок Ф. В. Мелиорация земель: учебное пособие. Горки, 1974. 155 с.

12. Исполинов А. А. К вопросу влияния глубины осушения на изменение водно-физических свойств торфяной почвы и урожай трав. Сб. научн. тр. Т. II. Минск: АН БССР, 1953. С. 51–64.

13. Тимофеев А. Ф., Комарова Л. А. Почвы выработанных торфяников Кировской области и их водный режим. Труды ГСХИ. 1971;41:56–58.

14. Уланов А. Н. Регулирование водно-физических и тепловых свойств выработанных торфяников. Сб. научн. тр. Калинин, 1983. С. 116–121.

15. Уланов А. Н. Торфяные и выработанные почвы южной тайги Евро-Северо-Востока России. Киров: ОАО «Дом печати – Вятка», 2005. 320 с.

16. Шуткин А. Т. Уплотняющее воздействие техники и урожайность трав на выработанных торфяниках. На торфяных почвах: научн. тр. Кировской лугоболотной опытной станции. Киров: типография «Миньон» ВМП «Авитек», 1993. Т. 2. Ч. 2. С. 52–53.

17. Копысов И. Я., Уланов Н. А. Особенности управления водным режимом выработанных торфяников, используемых в кормопроизводстве. Мелиорация и водное хозяйство. 2017;(5):7–12.
Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30528860 EDN: ZSBQJF

18. Каменнова И. Е., Минаев Т. Ю. Проект «Восстановление торфяных болот в России в целях предотвращения пожаров и смягчения изменений климата». Проблемы и перспективы устойчивого развития торфяного дела в России: мат-лы Международ. научн.-практ. конф. Тверь, 2018. С. 59–64.
Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35637199 EDN: XZWVZZ

19. Панов В. В., Кукушкина Е. Е. К вопросу о статусе обводненных торфяников и перспективах промышленного получения на них биомассы тростника. Проблемы и перспективы устойчивого развития торфяного дела в России: мат-лы Международ. научн.-практ. конф. Тверь, 2018. С. 124–129.
Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35637252&pff=1 EDN: XZWWQH

20. Метелев Н. Д. Особенности выращивания сосны обыкновенной на выработанных торфяниках торфомассива «Гадовское» Оричевского района, Кировской области. Многофункциональное адаптивное кормопроизводство: сб. научн. тр. М., 2018. Вып. 18(66). С. 205–210.
Режим доступа: https://www.vniikormov.ru/pdf/mnogofunktcionalnoe-adaptivnoe-kormoproizvodstvo-18-66.pdf

21. Метелев Н. Д. Современное состояние охотничьих ресурсов на территории выработанного торфомассива «Гадовское» в Оричевском районе Кировской области. Многофункциональное адаптивное кормопроизводство: сб. научн. тр. М., 2018. Вып. 18(66). С. 237–245.
Режим доступа: https://www.vniikormov.ru/pdf/mnogofunktcionalnoe-adaptivnoe-kormoproizvodstvo-18-66.pdf

22. Ершик О. А. Сабельник болотный как перспективное лекарственное растение. Многофункциональное адаптивное кормопроизводство: сб. научн. тр. М., 2018. Вып. 18(66). С. 246–250.
Режим доступа: https://www.vniikormov.ru/pdf/mnogofunktcionalnoe-adaptivnoe-kormoproizvodstvo-18-66.pdf

23. Кузмичева Н. А. Голубика болотная как перспективное лекарственное растение. Многофункциональное адаптивное кормопроизводство: сб. научн. тр. М., 2018. Вып. 18(66). С. 250–254.
Режим доступа: https://www.vniikormov.ru/pdf/mnogofunktcionalnoe-adaptivnoe-kormoproizvodstvo-18-66.pdf

24. Метелев Н. Д. Фенологические фазы развития болотных ягодных культур на торфомассиве «Гадовское» в Оричевском районе Кировской области. Многофункциональное адаптивное кормопроизводство: сб. научн. тр. М., 2018. Вып. 18(66). С. 261–269.
Режим доступа: https://www.vniikormov.ru/pdf/mnogofunktcionalnoe-adaptivnoe-kormoproizvodstvo-18-66.pdf

References

1. Maslov B. S. From the water object to rich land (historical and ecological aspects). Swamps and the Biosphere: Proceedings of the IXth International school of young scientists. Vladimir, 2015. pp. 93–108.

2. Dubakh A. D. Hydrology of wetlands. Moscow: *Gidrometeoizdat*, 1944. 228 p.

3. Kozlova V. A., Akhmet'eva N. P., Mikhaylov A. V. Chemical composition of natural and pyrolysis peat. Swamps and the Biosphere: Proceedings of the IXth International school of young scientists. Vladimir, 2015. pp. 209–213.

4. Peat fund of the Kirov region according to the state of exploration on January 1, 1969. Moscow, 1970. 499 p.

5. Yakimov V. P. Agricultural use of swamps in the Kirov region. Kirov: *Kirovskoe obl. izd-vo*, 1942. 101 p.

6. Letkovskiy S. T. Meadow farming and agrotechnics of grain crops on peatlands. Kirov: *Kraev. izd-vo (tip. Mestproma)*, 1936. 72 p.

7. Chirikin N. I. The experience of developing peatlands for cultural pastures. *Gidrotekhnika i melioratsiya*. 1972;(2):15–19. (In Russ.).

8. Zverkov Yu. V. The second life of peat bogs. Kirov: *Volgo-Vyat. kn. izd-vo: Kirov. otd-nie,* 1982. 80 p.

9. Ignatenok F. V. Closed soil drainage. Kirov: *Kn. izd-vo*, 1955. 85 p.

10. Ignatenok F. V. Closed soil drainage. Moscow: *Kolos*, 1965. 200 p.

11. Ignatenok F. V. Land reclamation: a textbook. Gorki, 1974. 155 p.

12. Ispolinov A. A. On the issue of the influence of the depth of drainage on the change in the water-physical properties of peat soil and the yield of grasses. Collection of scientific papers. Vol. II. Minsk: *AN BSSR*, 1953. pp. 51–64.

13. Timofeev A. F., Komarova L. A. Soils of the developed peatlands of the Kirov region and their water regime. *Trudy GSKhI*. 1971;41:56–58. (In Russ.).

14. Ulanov A. N. Regulation of the water-physical and thermal properties of the developed peatlands. Collection of scientific papers. Сборник научных трудов. Sbornik nauchnykh trudov. Kalinin, 1983. pp. 116–121.

15. Ulanov A. N. Peat and worked-out soils of the southern taiga of the Euro-Northeast of Russia. Kirov: *OAO «Dom pechati – Vyatka»*, 2005. 320 p.

16. Shutkin A. T. The compacting effect of technology and the yield of grasses on the developed peat bogs. On peat soils: scientific research of the Kirov Meadow-Swamp Experimental Station. Kirov: *tipografiya «Min'on» VMP «Avitek»*, 1993. Vol. 2. Part. 2. pp. 52–53.

17. Kopysov I. Ya., Ulanov N. A. Management features water regime of degraded peatlands used in forage production. *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo* = Melioration and Water Management. 2017;(5):7–12. (In Russ.). URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30528860

18. Kamennova I. E., Minaev T. Yu. Project on "Restoring peatlands in Russia - for fire prevention and climate change mitigation": experiences, prospects and lessons learnt. Problems and prospects of sustainable development of peat industry in Russia: Proceedings of the International scientific and practical Conference. Tver', 2018. pp. 59–64. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35637199

19. Panov V. V., Kukushkina E. E. On the status of rewetted peatlands and prospects for industrial production of reed biomass on them (*Phragmites australis*). Problems and prospects of sustainable development of peat industry in Russia: Proceedings of the International scientific and practical Conference Tver', 2018. С. 124–129. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35637252&pff=1

20. Metelev N. D. Features of cultivation of scots pine on peatlands of peatmass «Gadovskoe» Orichevsky district, Kirov region. Multifunctional adaptive feed production: collection of scientific papers. Moscow, 2018. Iss. 18(66). pp. 205–210.
URL: https://www.vniikormov.ru/pdf/mnogofunktcionalnoe-adaptivnoe-kormoproizvodstvo-18-66.pdf

21. Metelev N. D. Modern state of hunting resources the territory of the developed thomasina «Gadovskoe» in Orichevsky district of the Kirov region. Multifunctional adaptive feed production: collection of scientific papers. Moscow, 2018. Iss. 18(66). pp. 237–245.
URL: https://www.vniikormov.ru/pdf/mnogofunktcionalnoe-adaptivnoe-kormoproizvodstvo-18-66.pdf

22. Yorshik O. A. Potentilla marsh as a promising medicinal plant. Multifunctional adaptive feed production: collection of scientific papers. Moscow, 2018. Iss. 18(66). pp. 246–250.
URL: https://www.vniikormov.ru/pdf/mnogofunktcionalnoe-adaptivnoe-kormoproizvodstvo-18-66.pdf

23. Kuzmicheva N. A. Blueberry swamp as a promising medicinal plant. Multifunctional adaptive feed production: collection of scientific papers. Moscow, 2018. Iss. 18(66). pp. 250–254.
URL: https://www.vniikormov.ru/pdf/mnogofunktcionalnoe-adaptivnoe-kormoproizvodstvo-18-66.pdf

24. Metelev N. D. Phenological phases of development of marsh berry crops on thomasine «Gadovskoe» in Orichevsky district of the Kirov region. Multifunctional adaptive feed production: collection of scientific papers. Moscow, 2018. Iss. 18(66). pp. 261–269.
URL: https://www.vniikormov.ru/pdf/mnogofunktcionalnoe-adaptivnoe-kormoproizvodstvo-18-66.pdf

Сведения об авторах

Уланов Николай Анатольевич, кандидат с.-х. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Вятский государственный агротехнологический университет», Октябрьский пр-т, д. 133, г. Киров, Российская Федерация, 610017, e-mail: info@vgatu.ru; старший научный сотрудник, Кировская лугоболотная опытная станция – филиал ФГБНУ «Федеральный научный центр кормопроизводства и агроэкологии имени В. Р. Вильямса», д. 33, п. Юбилейный, Оричевского р-на, Кировской обл., Российская Федерация, 612097,
e-mail: bolotoagro50@mail.ru, **ORCID: https://orcid.org/0009-0007-7954-0411**

Уланов Анатолий Николаевич, доктор с.-х. наук, профессор, Кировская лугоболотная опытная станция – филиал ФГБНУ «Федеральный научный центр кормопроизводства и агроэкологии имени В. Р. Вильямса», д. 33, п. Юбилейный, Оричевского р-на, Кировской обл., Российская Федерация, 612097, e-mail: bolotoagro50@mail.ru; ФГБОУ ВО «Вятский государственный агротехнологический университет», Октябрьский пр-кт, 133, г. Киров, Российская Федерация, 610017, e-mail: info@vgatu.ru,
ORCID: https://orcid.org/0009-0005-3265-3254

Information about the authors

Nikolay A. Ulanov, PhD in Agricultural Science, associate professor, Vyatka State Agrotechnological University, Oktyabrsky pr-kt, 133, Kirov, Russian Federation, 610017, e-mail: info@vgatu.ru; senior researcher, Kirov Meadow-Swamp Experimental Station – branch Federal Williams Research Center of Forage Production & Agroecology, 33, Yubileiny settlement, Orichevsky district, Kirov region, Russian Federation, 612097,
e-mail: bolotoagro50@mail.ru, **ORCID: https://orcid.org/0009-0007-7954-0411**

Anatoly N. Ulanov, DSc in Agriculture, professor, Kirov Meadow-Swamp Experimental Station – branch Federal Williams Research Center of Forage Production & Agroecology, 33, Yubileiny settlement, Orichevsky district, Kirov region, Russian Federation, 612097, e-mail: bolotoagro50@mail.ru; Vyatka State Agrotechnological University, Oktyabrsky pr-kt, 133, Kirov, Russian Federation, 610017, e-mail: info@vgatu.ru,
ORCID: https://orcid.org/0009-0005-3265-3254

✉ – Для контактов / Corresponding author

ОБЗОРЫ/REVIEWS

https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.1.18-26
УДК 619:616.98:578.825.1:636.2

(cc) BY

Злокачественная катаральная горячка: патогенез, проблемы профилактики и контроля (обзор)

© 2024. С. Ш. Спицына, О. А. Бурова✉, П. А. Андриянов, П. А. Журилов, Е. А. Лискова, О. И. Захарова, А. И. Тютрина, Д. Д. Кашина, Н. А. Гребнев, В. Н. Качан, И. В. Яшин, А. А. Блохин
ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр вирусологии и микробиологии», Нижегородский научно-исследовательский ветеринарный институт – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр вирусологии и микробиологии», г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Злокачественная катаральная горячка – неконтагиозное инфекционное заболевание, спорадически возникающее в популяции крупного рогатого скота и диких парнокопытных животных. Источником возбудителя заболевания являются антилопы гну, овцы, козы, у которых инфекционный процесс протекает, как правило, бессимптомно. Проявление клинических и патологоанатомических признаков вариабельно, часто характеризуется поражением нервной, дыхательной и пищеварительной систем, в органах и тканях которых отмечают признаки лимфоцитарного и гистиоцитарного васкулита. Диагностика болезни осуществляется комплексно с применением клинических и гистологических методов, но основным методом является обнаружение в материале ДНК вируса с помощью ПЦР. При этом контроль и профилактика болезни имеют ряд сложностей, обусловленных недостаточной эффективностью диагностических мероприятий, отсутствием вакцин и устаревшей нормативно-правовой базой. В России нет доступных коммерческих наборов для диагностики болезни. Диагностировать злокачественную катаральную горячку могут те научно-исследовательские организации, где применяются сложные протоколы исследований. По причине недостаточной изученности патогенеза, до сих пор не увенчались успехом попытки создания эффективных вакцин против злокачественной катаральной горячки, что не позволяет реализовывать в полной мере профилактические мероприятия. Нормативные акты, определяющие подходы к контролю и ликвидации болезни, не актуализировались более 20 лет. Комплекс данных проблем заметно искажает представление об объективной эпизоотической ситуации по злокачественной катаральной горячке и способствует её скрытому распространению с неясным хозяйственно-экономическим ущербом.

Ключевые слова: *OvHV-2, овцы, крупный рогатый скот, этиология, профилактика, вакцинация*

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр вирусологии и микробиологии» (тема № FGNM-2022-0004).

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Спицына С. Ш., Бурова О. А., Андриянов П. А., Журилов П. А., Лискова Е. А., Захарова О. И., Тютрина А. И., Кашина Д. Д., Гребнев Н. А., Качан В. Н., Яшин И. В., Блохин А. А. Злокачественная катаральная горячка: патогенез, проблемы профилактики и контроля (обзор). Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2024;25(1):18–26. DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.1.18-26

Поступила: 07.11.2023 Принята к публикации: 17.01.2024 Опубликована онлайн: 28.02.2024

Malignant catarrhal fever: pathogenesis, problems of prevention and control (review)

© 2024. Svetlana Sh. Spitsyna, Olga A. Burova✉, Pavel A. Andriyanov, Pavel A. Zhurilov, Elena A. Liskova, Olga I. Zakharova, Anastasia I. Tutrina, Daria D. Kashina, Nikita A. Grebnev, Vladislav N. Kachan, Ivan V. Yashin, Andrey A. Blokhin
Federal Research Center for Virology and Microbiology, Branch in Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Malignant catarrhal fever is a non-contagious infectious disease that occurs sporadically in the population of cattle and wild artiodactyls. The source of the causative agent of the disease is wildebeest, sheep, and goats, in which the infectious process is usually asymptomatic. The manifestation of clinical and pathological signs is variable, often characterized by damage

to the nervous, respiratory and digestive systems, in the organs and tissues of which signs of lymphocytic and histiocytic vasculitis are noted. Diagnosis of the disease is carried out comprehensively using clinical and histological methods, but the main method is the detection of viral DNA in the material using PCR. However, control and prevention of the disease have a number of difficulties due to insufficient efficiency of diagnostic measures, lack of vaccines and outdated regulatory framework. There are no commercially available kits for diagnosing the disease in Russia. This diagnosis is available to research organizations, where complex research protocols are used. Due to insufficient knowledge of the pathogenesis, attempts to create effective vaccines against malignant catarrhal fever have not yet been successful, which does not allow for the full implementation of preventive measures. Regulatory acts defining approaches to control and elimination of the disease have not been updated for more than 20 years. The complex of these problems significantly distorts the objective epizootic situation on malignant catarrhal fever and contributes to its hidden spread with unclear economic and economic damage.

Keywords: *OvHV-2, sheep, cattle, etiology, prevention, vaccination*

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 Federal Research Center for Virology and Microbiology (theme No. FGNM-2022-0004). The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

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

For citations: Spitsyna S. Sh., Burova O. A., Andriyanov P. A., Zhurilov P. A., Liskova E. A., Zakharova O. I., Tutrina A. I., Kashina D. D., Grebnev N. A., Kachan V. N., Yashin I. V., Blokhin A. A. Malignant catarrhal fever: pathogenesis, problems of prevention and control (review). *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2024;25(1):18–26. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.1.18-26

Received: 07.11.2023 Accepted for publication: 17.01.2024 Published online: 28.02.2024

Злокачественная катаральная горячка (ЗКГ) является системным лимфопролиферативным заболеванием, которое, как правило, приводит к смерти восприимчивых животных. Возбудителем заболевания является группа вирусов из рода *Macavirus*, подсемейства *Gammaherpesvirina*e [1]. Резервуарные хозяева (антилопы гну, овцы, козы) выделяют вирусы во внешнюю среду и могут передавать их как при косвенном, так и прямом контакте, но при этом сами, как правило, не проявляют клинических признаков заболевания. Вирусы обладают выраженным тропизмом к клеткам многих тканей и органов, вследствие чего болезнь проявляется широким спектром клинических признаков [2]. Патогенез болезни сложен и является объектом пристального внимания исследователей. Особое внимание уделяется изучению иммунологических механизмов проявления болезни, что в перспективе позволит решить вопрос с её лечением и профилактикой. На данный момент эффективные методы лечения и вакцинации не разработаны, что приводит к экономическим и социальным последствиям во многих странах мира [3]. В Российской Федерации борьба со злокачественной катаральной горячкой регламентируется, очевидно, устаревшими нормативными актами[1], что негативно сказывается как на регистрации болезни, так и в борьбе с ней.

Цель работы – обобщить актуальные научные данные по эпизоотологии, патогенезу, диагностике, вакцинации и профилактике злокачественной катаральной горячки.

Материал и методы. Поиск источников проводили путем скрининга международных баз научного цитирования Web of Science, PubMed, Scopus, Google Scholar, Mendeley и базы Российского индекса научного цитирования. Критериями служили ключевые слова: злокачественная катаральная горячка (foot and mouth disease), вирус (virus), этиология (etiology), распространение (spread), факторы риска (risk factors), профилактика (prevention). После исключения повторяющихся и непроверенных данных, выбора публикаций, полностью соответствующих цели работы, был отобран 31 источник.

Основная часть. *Этиология*. Злокачественная катаральная горячка является заболеванием крупного рогатого скота и других парнокопытных животных, возбудителями которого являются вирусы семейства *Herpesviridae*, подсемейства *Gammaherpesvirinae*, рода *Macavirus*.

Известно несколько разновидностей герпесвирусов, вызывающих синдромы ЗКГ и названных по виду резервуарного хозяина: антилопа гну (AlHV-1, AlHV-2); лошадиных антилоп (HiHV-1) и/или сернобыков (MCF-oryx); овец (OvHV-2); коз (CpHV-2; CpHV-3); Альпийского горного козла (MCF-ibex); овцебыка (MCF-muskox); Берберийского барана (MCF-aoudad).

[1]Временная инструкция о мероприятиях по борьбе со злокачественной катаральной горячкой крупного рогатого скота. Россельхознадзор. [Электронный ресурс]. URL: https://www.fsvps.gov.ru/files/vremennaja-instrukcija-o-meroprijatijah-6/ (дата обращения: 10.10.2023).

Основными этиологическими агентами вспышек ЗКГ являются AlHV-1 и OvHV-2. Они вызывают скрытую инфекцию у своих резервуарных хозяев (антилоп гну для AlHV-1 и овец для OvHV-2), но смертельное заболевание у крупного рогатого скота, оленей, бизонов, водяных буйволов и свиней [4, 5]. В отличие от AlHV-1, OvHV-2 не выделялся в культуре клеток, что определяет трудности в его изучении [6].

Распространение. Болезнь регистрируют на всех континентах Земли, кроме Антарктиды, где есть восприимчивые животные и животные – резервуары вируса. Вспышки носят спорадический характер, с охватом до 40 % животных стада [7]. При этом вспышки, вызванные AlHV-1, регистрируются в странах, входящих в ареал антилоп гну, – странах Африки, иногда в зоопарках. Случаи болезни, причиной которых является OvHV-2, отмечаются повсеместно по причине широкого распространения овец.

По данным Россельхознадзора, в Российской Федерации за последние 5 лет официально не зарегистрировано неблагополучных пунктов по злокачественной катаральной горячке. Последний зарегистрированный случай отмечен в 2017 году в Удмуртии[2]. Отсутствие четких ветеринарных правил, предусматривающих обязательную нотификацию болезни, приводит к искажению видения объективной эпизоотической ситуации по ЗКГ. Так, нами инфекция была установлена в Иркутской и Псковской областях в 2017 и 2022 годах соответственно (рис. 1). Это позволяет говорить о более широком распространении болезни, чем это представлено в официальных источниках информации.

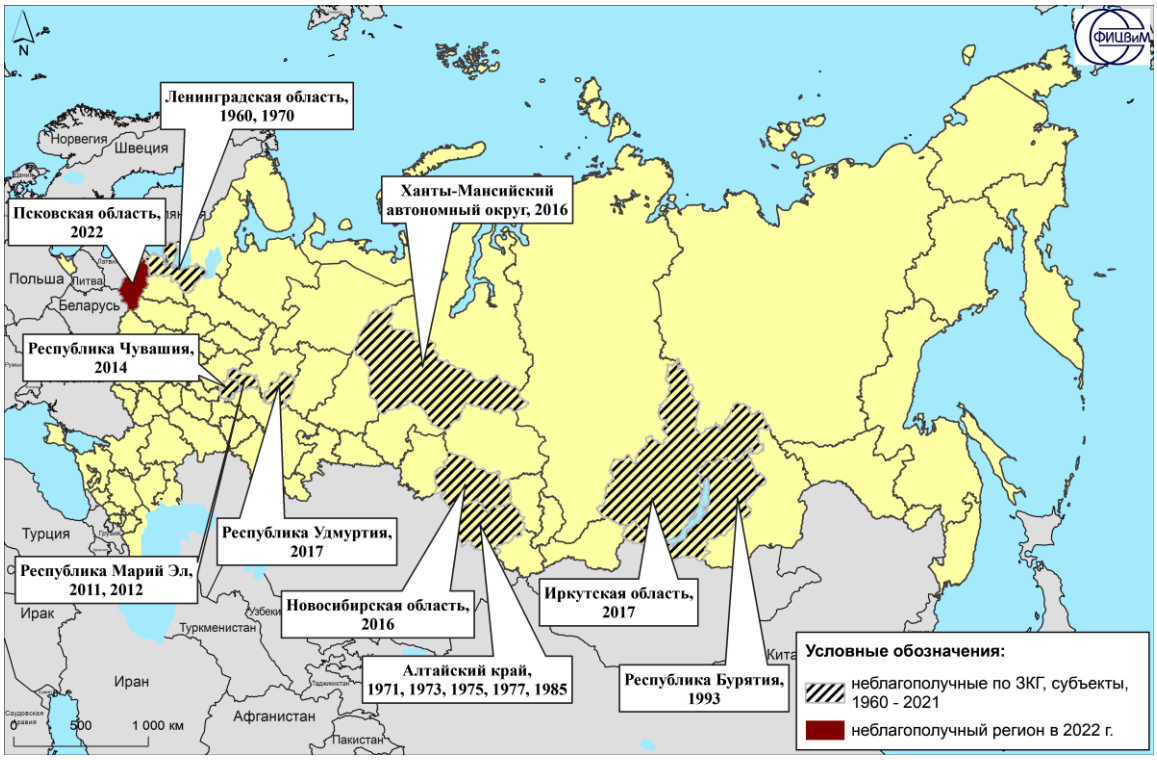

Рис. 1. **Зарегистрированные случаи злокачественной катаральной горячки в России за период 1960–2022 гг. /**
Fig. 1. **Registered cases of Malignant catarrhal fever in Russia for the period 1960–2022**

Восприимчивые животные. К заболеванию восприимчивы парнокопытные, в т. ч. крупный рогатый скот, олени, водяные буйволы, антилопы, лоси, северные олени и жирафы, иногда заболевают свиньи [8, 9]. У этих животных заболевание проявляется выраженной клинической картиной и завершается в большинстве случаев гибелью. В эксперименте болезнь развивается у хомяков, кроликов, морских свинок [10, 11, 12]. В Российской Федерации основным видом животных, у которого диагностируют злокачественную катальную горячку, является крупный рогатый скот[3].

[2]Аналитический отчет по эпидситуации в стране (по данным Департамента ветеринарии МСХ). Россельхознадзор. [Электронный ресурс]. URL: https://fsvps.gov.ru/files/otchet-2017-god/ (дата обращения: 06.08.2023).
[3]Там же

Пути передачи вируса. Основные способы передачи вируса – контактный, воздушно-капельный, возможно и алиментарный, при проглатывании корма, обсемененного вирусом. Имеются данные о внутриутробном (трансплацентарном) инфицировании плодов [7, 13].

Патогенез. Патогенез злокачественной катаральной горячки еще недостаточно изучен, несмотря на многочисленные исследования в данной области. Однако известно, что злокачественная катаральная горячка представляет собой иммунопатологический процесс [14]. Первично вирус реплицируется в клетках легких, после чего поражаются лимфоциты и эндотелиоциты. Это приводит к развитию дисфункции иммунорегуляторного звена иммунной системы и доброкачественной пролиферации лимфоцитов, которые инфильтрируют ткани. При этом основную массу лимфоцитов составляют инфицированные цитотоксические γδT-клетки фенотипа $CD8^{+}$/перфорин$^{+}$. При инфицировании эндотелиальных клеток основным патологическим процессом является системный васкулит, сопровождающийся увеличением порозности кровеносных сосудов и нарушением свертывающей системы крови, что проявляется клеточной инфильтрацией в окружающие ткани и тромбозами [15, 16]. Таким образом, можно представить патогенез болезни как совокупность иммунологического и васкуляторного компонентов (рис. 2). Запуск каскада описанных иммунных и васкуляторных реакций приводит к развитию поражений большинства органов, включая головной мозг. В связи с этим клинические признаки болезни могут быть разнообразны и иметь различное сочетание симптомов.

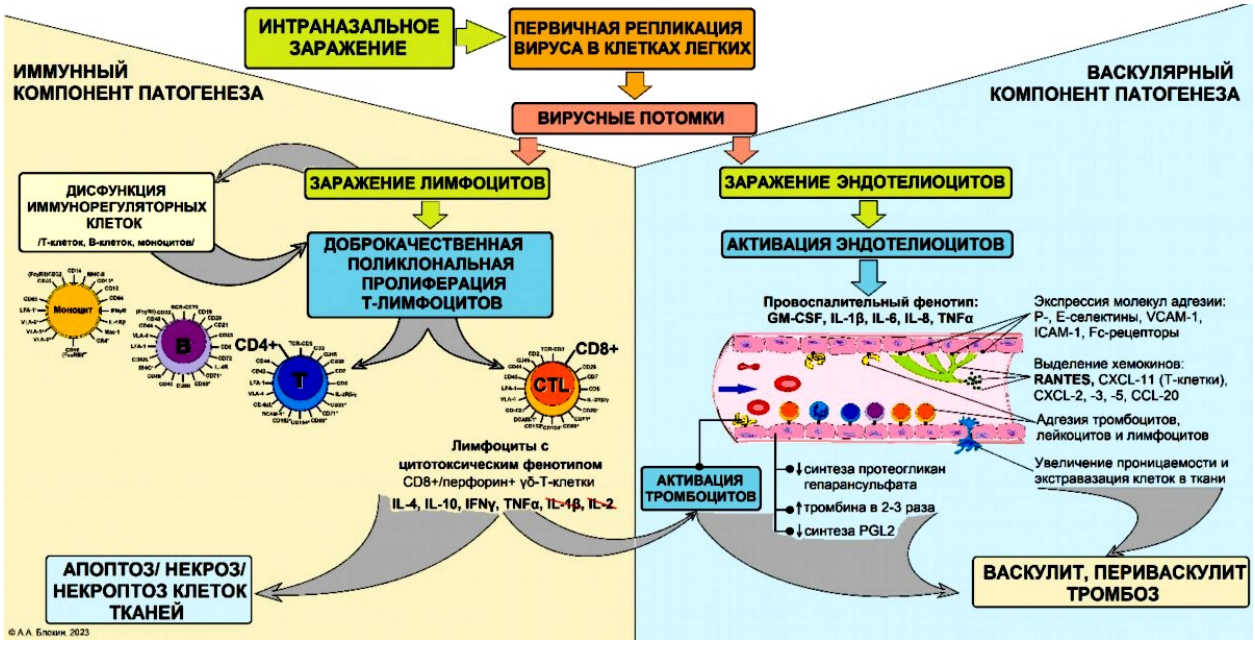

Рис. 2. **Патогенез злокачественной катаральной горячки /**
Fig. 2. **Pathogenesis of malignant catarrhal fever**

У овец, которые являются резервуаром вируса ЗКГ, при поражении легких отмечается повышенная экспрессия генов иммунного ответа, что вызывает быстрый и эффективный иммунный ответ и тем самым способствует поддержанию латентной формы болезни со спорадическими эпизодами продуктивной литической репликации в эпителиальных клетках носовых раковин, что приводит к выделению вируса [17, 18, 19].

Клинические признаки. Инкубационный период достаточно продолжительный и варьирует от двух до десяти недель [11, 20]. При злокачественной катаральной горячке различают острое и подострое течение. Наиболее типичные клинические признаки злокачественной катаральной горячки – лихорадка, анорексия, поражение центральной нервной системы, истечения из глаз и носа, диарея [7, 21]. Характерным симптомом при заболевании у крупного рогатого скота является эрозивно-язвенное воспаление слизистых оболочек верхних дыхательных путей и ротовой полости, что сопровождается серозными и гнойными выделениями из носа и глаз. Нередко отмечается помутнение роговицы, увеличение периферических лимфатических узлов, истечения из глаз и светобоязнь. Воспаление в ротовой

полости часто переходит на слизистую оболочку глотки, что вызывает затруднение глотания и анорексию. Выделяющаяся из ротовой полости слюна содержит обрывки мертвых тканей и издает неприятный запах [11, 20]. Иногда типичные клинические признаки могут отсутствовать, но животные при этом являются инфицированными OvHV-2 [12].

У оленей, инфицированных OvHV-2, отмечаются аналогичные клинические признаки, что и крупного рогатого скота, но чаще поражается желудочно-кишечный тракт, а гибель наступает через 48 часов без проявления симптомов [22].

Несмотря на то, что в эпизоотическом процессе козы выступают в роли резервуарных хозяев, у них возможно развитие клинически выраженного заболевания с поражением центральной нервной системы (атаксия, тремор головы, тонико-клонический спазм), повышением температуры тела, диареей, помутнением роговицы [23].

У свиней регистрируют клинические признаки, схожие с симптомами крупного рогатого скота: анорексия, сонливость, атаксия, лихорадка с температурой тела до 41 °С, судороги, гиперестезия, эрозии на морде и слизистых оболочках рта и носа, а также множественные поражения кожи [1, 24].

Патоморфологические изменения характеризуются триадой основных признаков: артериитом-флебитом кровеносных сосудов среднего калибра, лимфоидной пролиферацией и фибриноидным некрозом слизистой оболочки пищеварительного тракта и мочеточников. Кроме этого, наблюдаются выделения из носа, геморрагический цистит, некрогеморрагическое воспаление слепой кишки, эрозивно-язвенный ринит, стоматит, фарингит, ларингит и эзофагит. В легких отмечается образование участков уплотнения легочной ткани [17, 18].

Диагностические признаки. При развитии инфекции, вызванной вирусом ЗКГ, в легких наблюдается утолщение альвеолярных перегородок, внутриальвеолярные кровоизлияния, инфильтрация лимфоцитами, васкулит и периваскулит, а также метаплазия тканей. Последняя регистрируется в плевре легких и характеризуется трансформацией мезотелиальных клеток плевры легких в хондробласты с развитием хрящевой ткани. В кишечнике отмечается инфильтрация лимфоцитами слизистой оболочки и подслизистой основы, фибриноидный васкулит кровеносных сосудов и атрофический энтерит с деструкцией ворсинок. При этом структура кишечных желез сохраняется. В селезенке и лимфатических узлах, ввиду массовой эмиграции лимфоцитов, отмечается диффузное обеднение лимфоидных фолликулов, а также васкулит кровеносных сосудов. Часто поражения обнаруживают в почках, где наблюдается интерстициальный нефрит, васкулит и периваскулит с инфильтрацией тканей лимфоцитами. Цитотоксическое воздействие $CD8^+$ приводит к некрозу клеток канальцев почек и их десквамации в их просвет. В просвете они либо становятся гиалиновыми цилиндрами, либо вымываются, что проявляется образованием пустот. Подобные инфильтраты наблюдаются и в коре надпочечников (клубочковой зоне). В головном мозге отмечается периваскулярное воспаление и локальная (около сосудов) инфильтрация тканей мозга лимфоцитами. Отмечается некроз нейронов с вакуолизацией тканей. В мозжечке, кроме васкулита и периваскулита кровеносных сосудов, оболочек и вещества мозжечка, отмечается частичная потеря клетками Пуркинье грушевидной формы и развивается вакуолизация его тканей. Описанные изменения являются важными диагностическими признаками [25].

Диагностика. Диагноз обычно устанавливается путем наблюдения за клиническими признаками, выявления характерных гистопатологических изменений, а также антител в ИФА, обнаружения вирусной ДНК в биологическом материале от инфицированных животных. Материалом для исследования служат кровь, ткани легких, селезенки, лимфатических узлов, трахеи, печени, почек, головного мозга, мозжечка. Десквамированный эпителий ротовой полости и глотки, как и образцы истечений, не могут служить материалом для диагностики ЗКГ, поскольку патологические процессы в ротовой полости и глотке вызваны воздействием компонентов иммунной системы, а не вируса[4] [3].

Обнаружение вирусной ДНК с помощью ПЦР является основным методом диагностики ЗКГ. Оценка клинических признаков дополняется гистологическими исследованиями органов и тканей с выявлением лимфоидной инфильтрации

[4]Malignant Catarrhal Fever. (по состоянию на 1 ноября 2020 года). [Электронный ресурс]. URL: https://www.oie.int/fileadmin/Home/eng/Animal_Health_in_the_World/docs/pdf/Disease_cards/MALIGNANT_CATHARRAL_FEVER.pdf (дата обращения: 17.09.2023).

и васкулитов во многих органах и тканях[5]. Кроме этого, фиксированные в формалине ткани можно исследовать на наличие генома OvHV-2 с помощью классической ПЦР и ПЦР в реальном времени [26]. Окончательный диагноз и доказательства причинно-следственной связи заболевания и гибели животных с их инфицированием вирусом ЗКГ устанавливают с помощью ПЦР с последующим секвенированием ампликонов [3, 6]. Для идентификации и характеристики γ-герпесвирусов, вызывающих злокачественную катаральную горячку у восприимчивых животных, используется консенсусная ПЦР пангерпесвируса, которая амплифицирует ген ДНК-полимеразы всех членов семейства *Herpesviridae* с преимуществом универсальности. Для серологической диагностики (при обследовании резервуарных хозяев) исследуют парные сыворотки в ИФА [6]. Используется многовидовой ИФА с конкурентным ингибированием, который нацелен на консервативный антигенный эпитоп 15-А злокачественной катаральной горячки, ассоциированных членов макавирусов. Однако, несмотря на обилие диагностических тестов, доступных коммерческих наборов для диагностики злокачественной катаральной горячки в России нет.

Дифференциальная диагностика. При постановке диагноза исключают вирусную диарею крупного рогатого скота, инфекционный ринотрахеит, ящур, блютанг, везикулярный стоматит [27].

Вакцинация. Особенности патогенеза болезни, связанные с поражением иммунной системы, обуславливают отсутствие как постинфекционного, так и поствакцинального иммунитета. Поэтому попытки создания эффективной вакцины из инактивированного и аттенуированного вируса не увенчались успехом [28].

Профилактика и меры борьбы. На данный момент единственным средством профилактики является раздельное содержание восприимчивых (крупный рогатый скот, бизоны, олени, водяные буйволы) и резервуарных (овцы, антилопы гну, козы) видов животных [10, 28]. Важную роль на уровне заболеваемости играют климатические факторы, влияющие на выживаемость вируса в окружающей среде, наличие переносчиков, уровень стресса животных и другие [24]. В России порядок контроля распространения ЗКГ и реализации мероприятий по борьбе с болезнью регламентируется Инструкцией о мероприятиях по борьбе со злокачественной катаральной горячкой крупного рогатого скота, утвержденной Департаментом ветеринарии Минсельхоза РФ 18 января 1993 г. №22-4-2/14 и Решению Россельхознадзора от 27.09.2017[6]. При этом данный документ является почти полной копией Временной инструкции о мероприятиях по борьбе со злокачественной катаральной горячкой крупного рогатого скота от 1958 года. Именно этот документ опубликован на сайте Россельхознадзора, что, несомненно, не способствует эффективному контролю и борьбе с болезнью. В инструкции приводятся давно не актуальные данные об этиологии злокачественной катаральной горячки. Отсутствуют описание клинических, эпизоотологических и патологоанатомических признаков, а также современных методических подходов к диагностике болезни. Согласно инструкции, для диагностики рекомендуется отбирать сыворотки крови, что не позволит поставить достоверный диагноз по причине отсутствия в сыворотке крови как самого вируса, так и антител, ввиду слабого специфического иммунного ответа у восприимчивых видов животных. В связи с этим требуется переработка действующей инструкции, в т. ч. с использованием представленных в настоящей статье данных.

Заключение. Злокачественная катаральная горячка является системным пролиферативным заболеванием, с недостаточно ясным патогенезом, с разнообразными клиническими признаками, которое трудно подвергается лечению и заканчивается в основном летальным исходом. Заболевание наносит значительный экономический ущерб сельскохозяйственным предприятиям и хозяйствам, особенно тем, где используется совместное содержание восприимчивых и резервуарных животных.

В настоящее время все аспекты патогенеза злокачественной катаральной горячки, особенно иммунологический, активно изучаются. Решение вопросов патогенеза позволит разработать вакцину, способы профилактики и лечения болезни. Кроме этого, в России отсутствуют актуальные ветеринарные правила, нет диагностических

[5]URL: https://fsvps.gov.ru/files/vremennaja-instrukcija-o-meroprijatijah-6/
[6]Там же

наборов для выявления генов или вируса злокачественной катаральной горячки. Это ставит под угрозу своевременное выявление болезни, искажает видение эпизоотической ситуации и, как следствие, приводит к серьезным ветеринарным и экономическим последствиям.

References

1. Albini S., Zimmermann W., Neff F., Ehlers B., Häni H., Li H., Hüssy D., Casura C. H., Engels M., Ackermann M. Porcine malignant catarrhal fever: diagnostic findings and first detection of the pathogenic agent in diseased swine in Switzerland. Schweizer Archiv fur Tierheilkunde. 2003;145(2):61–68. DOI: https://doi.org/10.1024/0036-7281.145.2.61

2. Alcaraz A., Warren A., Jackson C., Gold J., McCoy M., Cheong S. H., Kimball S., Sells S., Taus N. S., Divers T., Li H. Naturally occurring sheep-associated malignant catarrhal fever in North American pigs. Journal of Veterinary Diagnostic Investigation. 2009;21(2):250–253. DOI: https://doi.org/10.1177/104063870902100214

3. Carvallo F. R., Uzal F. A., Moore J. D., Jackson K., Nyaoke A. C., Naples L., Davis-Powell J., Stadler C. K., Boren B. A., Cunha C., Li H., Pesavento P. A. Ibex-Associated Malignant Catarrhal Fever in Duikers (Cephalophus Spp). Veterinary pathology. 2020;57(4):577–581. DOI: https://doi.org/10.1177/0300985820918313

4. Myster F., Gong M. J., Javaux J., Suárez N. M., Wilkie G. S., Connelley T., Vanderplasschen A., Davison A. J., Dewals B. G. Alcelaphine herpesvirus 1 genes A7 and A8 regulate viral spread and are essential for malignant catarrhal fever. PLOS Pathogens. 2020;16(3):e1008405. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1008405

5. Saura-Martinez H., Al-Saadi M., Stewart J. P., Kipar A. Sheep-Associated Malignant Catarrhal Fever: Role of Latent Virus and Macrophages in Vasculitis. Veterinary pathology. 2021;58(2):332–345. DOI: https://doi.org/10.1177/0300985820978310

6. Turk N., Habuš J., Friess M., Zobel R., Grabarević Ž., Barbić L., Štritof Z., Milas Z., Starešina V. Demonstration and quantification of ovine herpesvirus 2 in Croatia - a case report. Veterinarski Arhiv, 2010;80(1):135–143. URL: https://hrcak.srce.hr/en/56050

7. Russell G. C., Stewart J. P., Haig D. M. Malignant catarrhal fever: A review. Veterinary journal. 2009;179(3):324–335. DOI: https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2007.11.007

8. Li H., Brooking A., Cunha C. W., Highland M. A., O'Toole D., Knowles D. P., Taus N. S. Experimental induction of malignant catarrhal fever in pigs with ovine herpesvirus 2 by intranasal nebulization. Veterinary microbiology. 2012;159(3-4):485–489. DOI: https://doi.org/10.1016/j.vetmic.2012.04.016

9. Palmer M. V., Thacker T. C., Madison R. J., Koster L. G., Swenson S. L., Li H. Active and latent ovine herpesvirus-2 (OvHV-2) infection in a herd of captive white-tailed deer (Odocoileus virginianus). Journal of comparative pathology. 2013;149(2-3):162–166. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jcpa.2013.01.005

10. Decker C., Hanley N., Czajkowski M., Morrison T. A., Keyyu J., Munishi L., Lankester F., Cleaveland S. Predicting uptake of a malignant catarrhal fever vaccine by pastoralists in northern Tanzania: Opportunities for improving livelihoods and ecosystem health. Ecological Economics. 2021;190:107189. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2021.107189

11. Garmatz S. L., Irigoyen L. F., Rech R. R., Brown C. C., Zhang J., Barros C. S. L. Malignant catarrhal fever in cattle in Rio Grande do Sul, Brazil: Experimental transmission to cattle and characterization of the etiological agent Pesquisa Veterinária Brasileira. 2004;24(2):93–103. DOI: https://doi.org/10.1590/S0100-736X2004000200009

12. Headley S. A., de Lemos G. A. A., Dall Agnol A. M., Xavier A. A. C., Depes V. C. A., Yasumitsu C. Y., Oliveira T. E. S., Silva L. E., Faccin T. C., Alfieri A. A., Lisboa J. A. N. Ovine gammaherpesvirus 2 infections in cattle without typical manifestations of sheep-associated malignant catarrhal fever and concomitantly infected with bovine coronavirus. Brazilian Journal of Microbiology. 2022;53(1):433–446. DOI: https://doi.org/10.1007/s42770-021-00653-6

13. Headley S. A., Pimentel L. A., Oliveira V. H., Toma H. S., Alfieri A. F., Carvalho A. M., dos Santos M. D., Alfieri A. A. Transplacental Transmission of Ovine Herpesvirus 2 in Cattle with Sheep-associated Malignant Catarrhal Fever. Journal of comparative pathology. 2015;153(4):206–211. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jcpa.2015.10.175

14. Jacobsen B., Thies K., von Altrock A., Förster C., König M., Baumgärtner W. Malignant catarrhal fever-like lesions associated with ovine herpesvirus-2 infection in three goats. Veterinary microbiology. 2007;124(3-4):353–357. DOI: https://doi.org/10.1016/j.vetmic.2007.04.037

15. Davison A. J., Eberle R., Ehlers B., Hayward G. S., McGeoch D. J., Minson A. C., Pellett P. E., Roizman B., Studdert M. J., Thiry E. The order Herpesvirales. Archives of virology. 2009;154(1):171–177. DOI: https://doi.org/10.1007/s00705-008-0278-4

16. Simon S., Li H., O'Toole D., Crawford T. B., Oaks J. L. The vascular lesions of a cow and bison with sheep-associated malignant catarrhal fever contain ovine herpesvirus 2-infected CD8(+) T lymphocytes. The Journal of general virology. 2003;84(8):2009–2013. DOI: https://doi.org/10.1099/vir.0.19048-0

17. Cunha C. W., Gailbreath K. L., O'Toole D., Knowles D. P., Schneider D. A., White S. N., Taus N. S., Davies C. J., Davis W. C., Li H. Ovine herpesvirus 2 infection in American bison: virus and host dynamics in the development of sheep-associated malignant catarrhal fever. Veterinary microbiology. 2012;159(3-4):307–319. DOI: https://doi.org/10.1016/j.vetmic.2012.04.021

18. Jayawardane G., Russell G. C., Thomson J., Deane D., Cox H., Gatherer D., Ackermann M., Haig D. M., Stewart J. P. A captured viral interleukin 10 gene with cellular exon structure. The Journal of general virology. 2008;89(Pt 10):2447–2455. DOI: https://doi.org/10.1099/vir.0.2008/001743-0

19. Li H., Cunha C. W., Davies C. J., Gailbreath K. L., Knowles D. P., Oaks J. L., Taus N. S. Ovine herpesvirus 2 replicates initially in the lung of experimentally infected sheep. The Journal of general virology. 2008;89(7):1699–1708. DOI: https://doi.org/10.1099/vir.0.2008/000554-0

20. Abd El Rahman S., Ateya A., El-Beskawy M., Wernike K., Hoffmann B., Eschbaumer M. Field Observations and Genetic Characterization of Sheep-Associated Malignant Catarrhal Fever in Egypt. 2018. Veterinary sciences. 2020;7(4):201. DOI: https://doi.org/10.3390/vetsci7040201

21. Costa É. A., Bastianetto E., Vasconcelos A. C., Bomfim M. R. Q., da Fonseca F. G., Gomes A. D., Leite R. C., Resende M. An outbreak of malignant catarrhal fever in Murrah buffaloes in Minas Gerais, Brazil. Pesquisa Veterinária Brasileira. 2009;29(5):395–400. DOI: https://doi.org/10.1590/S0100-736X2009000500006

22. O'Toole D., Li H. The pathology of malignant catarrhal fever, with an emphasis on ovine herpesvirus 2. Veterinary pathology. 2014;51(2):437–452. DOI: https://doi.org/10.1177/0300985813520435

23. Thies K., Jacobsen B., von Altrock A., Foerster Ch., Baumgaertner W., Ganter M. Clinical symptoms in goats with malignant catarrhal fever-like lesions. Tierarztliche Praxis Ausgabe G: Grosstiere – Nutztiere, 2008;36(1):20–26.

24. Li H., Hua Y., Snowder G., Crawford T. B. Levels of ovine herpesvirus 2 DNA in nasal secretions and blood of sheep: implications for transmission. Veterinary microbiology. 2001;79(4):301–310. DOI: https://doi.org/10.1016/s0378-1135(00)00367-9

25. Li H., Cunha C. W., Taus N. S., Knowles D. P. Malignant catarrhal fever: inching toward understanding. Annual review of animal biosciences. 2014;2:209–233. DOI: https://doi.org/10.1146/annurev-animal-022513-114156

26. Pesavento P. A., Cunha C. W., Li H., Jackson K., O'Toole D. In Situ Hybridization for Localization of Ovine Herpesvirus 2, the Agent of Sheep-Associated Malignant Catarrhal Fever, in Formalin-Fixed Tissues. Veterinary pathology. 2019;56(1):78–86. DOI: https://doi.org/10.1177/0300985818798085

27. Zhu H., Huang Q., Hu X., Chu W., Zhang J., Jiang L., Yu X., Zhang X., Cheng S. Caprine herpesvirus 2-associated malignant catarrhal fever of captive sika deer (*Cervus nippon*) in an intensive management system. BMC veterinary research. 2018;14(1):38. DOI: https://doi.org/10.1186/s12917-018-1365-8

28. Sood R., Hemadri D., Bhatia S. Sheep associated malignant catarrhal fever: an emerging disease of bovids in India. Indian journal of virology. 2013;24(3):321–331. DOI: https://doi.org/10.1007/s13337-013-0163-y

Сведения об авторах

Спицына Светлана Шагитовна, кандидат вет. наук, зам. руководителя группы, Нижегородский научно-исследовательский ветеринарный институт – филиал ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр вирусологии и микробиологии», ул. Ветеринарная, д. 3, г. Нижний Новгород, Российская Федерация, e-mail: info@ficvim.ru, **ORCID: http://orcid.org/0000-0002-5239-8036**

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

Андриянов Павел Алексеевич, начальник группы, Нижегородский научно-исследовательский ветеринарный институт – филиал ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр вирусологии и микробиологии», ул. Ветеринарная, д. 3, г. Нижний Новгород, Российская Федерация, e-mail: info@ficvim.ru, **ORCID: http://orcid.org/0000-0001-5187-3213**

Журилов Павел Аркадьевич, начальник группы, Нижегородский научно-исследовательский ветеринарный институт – филиал ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр вирусологии и микробиологии», ул. Ветеринарная, д. 3, г. Нижний Новгород, Российская Федерация, e-mail: info@ficvim.ru, **ORCID: http://orcid.org/0000-0003-0678-1170**

Лискова Елена Афанасьевна, кандидат вет. наук, ведущий научный сотрудник, Нижегородский научно-исследовательский ветеринарный институт – филиал ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр вирусологии и микробиологии», ул. Ветеринарная, д. 3, г. Нижний Новгород, Российская Федерация, e-mail: info@ficvim.ru, **ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4324-725X**

Захарова Ольга Игоревна, научный сотрудник отдела эпизоотологии и оценки риска, связанного со здоровьем животных, Нижегородский научно-исследовательский ветеринарный институт – филиал ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр вирусологии и микробиологии», ул. Ветеринарная, д. 3, г. Нижний Новгород, Российская Федерация, e-mail: info@ficvim.ru, **ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1408-2989**

Тютрина Анастасия Игоревна, исследователь, Нижегородский научно-исследовательский ветеринарный институт – филиал ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр вирусологии и микробиологии», ул. Ветеринарная, д. 3, г. Нижний Новгород, Российская Федерация, e-mail: info@ficvim.ru, **ORCID: http://orcid.org/0000-0003-1636-2148**

Кашина Дарья Дмитриевна, исследователь, Нижегородский научно-исследовательский ветеринарный институт – филиал ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр вирусологии и микробиологии», ул. Ветеринарная, д. 3, г. Нижний Новгород, Российская Федерация, e-mail: info@ficvim.ru, **ORCID: http://orcid.org/0000-0002-2291-6998**

Гребнев Никита Андреевич, исследователь, Нижегородский научно-исследовательский ветеринарный институт – филиал ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр вирусологии и микробиологии», ул. Ветеринарная, д. 3, г. Нижний Новгород, Российская Федерация, e-mail: info@ficvim.ru, **ORCID: http://orcid.org/0009-0005-1305-5822**

Качан Владислав Николаевич, лаборант, Нижегородский научно-исследовательский ветеринарный институт – филиал ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр вирусологии и микробиологии», ул. Ветеринарная, д. 3, г. Нижний Новгород, Российская Федерация, e-mail: info@ficvim.ru,
ORCID: http://orcid.org/0009-0001-0198-190X

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

Блохин Андрей Александрович, кандидат вет. наук, ведущий научный сотрудник отдела эпизоотологии и оценки риска, связанного со здоровьем животных, Нижегородский научно-исследовательский ветеринарный институт – филиал ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр вирусологии и микробиологии», ул. Ветеринарная, д. 3, г. Нижний Новгород, Российская Федерация, e-mail: info@ficvim.ru, **ORCID: http://orcid.org/0000-0001-5161-1184**

Information about the authors

Svetlana Sh. Spitsyna, PhD in Veterinary Science, Deputy Team Leader, Federal Research Center for Virology and Microbiology, Branch in Nizhny Novgorod, Veterinarnaya st., 3, Nizhny Novgorod, Russian Federation,
e-mail: info@ficvim.ru, **ORCID: http://orcid.org/0000-0002-5239-8036**

✉ **Olga A. Burova**, Deputy Head of the group, the Department of Epizootology and Risk Assessment Associated with Animal Health, Federal Research Center for Virology and Microbiology, Branch in Nizhny Novgorod, Veterinarnaya st., 3, Nizhny Novgorod, Russian Federation, e-mail: info@ficvim.ru,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-5396-0334, e-mail: burovaolga@list.ru

Pavel A. Andriyanov, Team Leader, Federal Research Center for Virology and Microbiology, Branch in Nizhny Novgorod, Veterinarnaya st., 3, Nizhny Novgorod, Russian Federation, e-mail: info@ficvim.ru,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-5187-3213

Pavel A. Zhurilov, Team Leader, Federal Research Center for Virology and Microbiology, Branch in Nizhny Novgorod, Veterinarnaya st., 3, Nizhny Novgorod, Russian Federation, e-mail: info@ficvim.ru,
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-0678-1170

Elena A. Liskova, PhD in Veterinary Science, leading researcher, Federal Research Center for Virology and Microbiology, Branch in Nizhny Novgorod, Veterinarnaya st., 3, Nizhny Novgorod, Russian Federation,
e-mail: info@ficvim.ru, **ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4324-725X**

Olga I. Zakharova, researcher, the Department of Epizootology and Risk Assessment Associated with Animal Health, Federal Research Center for Virology and Microbiology, Branch in Nizhny Novgorod, Veterinarnaya st., 3, Nizhny Novgorod, Russian Federation, e-mail: info@ficvim.ru, **ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1408-2989**

Anastasia I. Tutrina, researcher, Federal Research Center for Virology and Microbiology, Branch in Nizhny Novgorod, Veterinarnaya st., 3, Nizhny Novgorod, Russian Federation, e-mail: info@ficvim.ru,
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-1636-2148

Daria D. Kashina, researcher, Federal Research Center for Virology and Microbiology, Branch in Nizhny Novgorod, Veterinarnaya st., 3, Nizhny Novgorod, Russian Federation, e-mail: info@ficvim.ru, **ORCID: http://orcid.org/0000-0002-2291-6998**

Nikita A. Grebnev, researcher, Federal Research Center for Virology and Microbiology, Branch in Nizhny Novgorod, Veterinarnaya st., 3, Nizhny Novgorod, Russian Federation, e-mail: info@ficvim.ru, **ORCID: http://orcid.org/0009-0005-1305-5822**

Vladislav N. Kachan, laboratory assistant, Federal Research Center for Virology and Microbiology, Branch in Nizhny Novgorod, Veterinarnaya st., 3, Nizhny Novgorod, Russian Federation, e-mail: info@ficvim.ru,
ORCID: http://orcid.org/0009-0001-0198-190X

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

Andrey A. Blokhin, PhD in Veterinary Science, leading researcher, the Department of Epizootology and Risk Assessment Associated with Animal Health, Federal Research Center for Virology and Microbiology, Branch in Nizhny Novgorod, Veterinarnaya st., 3, Nizhny Novgorod, Russian Federation, e-mail: info@ficvim.ru,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-5161-1184

✉ – Для контактов / Corresponding author

https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.1.27-34
УДК 631.527.8:633.16

Новые источники селекционно-ценных признаков ячменя ярового для условий южной зоны Центрального региона РФ

© 2024. О. В. Левакова✉

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

Цель исследований – изучить в условиях Рязанской области (южная зона Центрального региона РФ) новый сортимент ячменя ярового и выявить источники селекционно-ценных признаков для дальнейшего использования их в гибридизации. Наблюдение, изучение и сравнение 11 новых сортов ярового ячменя (стандарт – сорт Надежный) проводили в 2020–2022 гг. на естественном инфекционном фоне (почва – темно-серая лесная тяжелосуглинистая). Установлено, что наибольшую среднюю урожайность за годы исследований имели сорта Знатный (Россия) – 6,38 т/га, Эллинор (Германия) – 6,02 т/га и Куфаль (Беларусь) – 5,98 т/га. Выявили низкорослые формы – германские сорта КВС Вермонт и Эллинор, высота которых находится в пределах 63–67 см и мало изменяется по годам исследований (CV, % = 3,9…6,0). Наименьшим содержанием протеина в зерне характеризовались германские сорта Эллинор (12,31 %), КВС Харрис (12,43 %) и французский сорт Рапид (12,69 %). В целях повышения качества фуража выделена группа высокобелковых ячменей: Памяти Чепелева (15,31 %) (Россия), Куфаль (14,61 %), Знатный (14,10 %). По длине колоса выделились сорта Бенте (8,2 см) (Германия) и Знатный (8,0 см). Установлено, что наибольшую продуктивную кустистость имеют сорта Памяти Чепелева и Лауреате (Швейцария) – 4,0 и 4,4. Наибольшее количество зерен в колосе сформировал сорт Знатный – 23,4 шт. Весь исследуемый исходный материала обладал высокой устойчивостью к фитопатогенам и полеганию. Новые сорта, выделенные в процессе исследований, являются ценным исходным материалом при создании новых высококонкурентных сортов ячменя ярового для условий южной зоны Центрального региона России.

Ключевые слова: *Hordeum vulgare* L., *новый сорт, продуктивность, структура урожая, гидротермические условия, корреляционная взаимосвязь*

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (тема № 0581-2019-0021).

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

Конфликт интересов*:* автор заявил об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования*:* Левакова О. В. Новые источники селекционно-ценных признаков ячменя ярового для условий южной зоны Центрального региона РФ. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2024;25(1):27–34.
DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.1.27-34

Поступила: 29.11.2022 Принята к публикации: 22.01.2023 Опубликована онлайн: 28.02.2024

New sources of agronomic traits of spring barley for the conditions of the southern zone of the Central region of the Russian Federation

© 2024. Olga V. Levakova✉

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

The purpose of the research is to study a new assortment of spring barley in the conditions of the Ryazan region (southern zone of the Central region of the Russian Federation) and identify sources of agronomic traits for their further use in hybridization. The observation, study and comparison of 11 new varieties of spring barley (standard – Nadezhny) was carried out in 2020–2022 on a natural infectious background (the soil was dark gray forest heavy loamy). It was found that the highest average yield over the years of the research was in the varieties Znatnyy (Russia) – 6.38 t/ha, Ellinor (Germany) – 6.02 t/ha and Kufal (Belarus) – 5.98 t/ha. There were identified low–growing forms - the German varieties KWS Vermont and Ellinor, the height of which was in the range of 63–67 cm and varied little over the years of the research (CV, % = 3.9...6.0). The lowest protein content in the grain was in the German varieties Ellinor (12.31 %), KWS Harris (12.43 %) and the French variety Rapid (12.69 %). In order to improve the quality of forage, a group of high-protein barley was identified: Pamyati Chepeleva (15.31 %) (Russia), Kufal (14.61 %), Znatnyy (14.10 %). According to the length of the ear, the varieties Bente (8.2 cm) (Germany) and Znatnyy (8.0 cm) stood out. It has been established that the varieties of Pamyati Chepeleva and Laureate (Switzerland) have the highest productive bushiness – 4.0 and 4.4. The largest number of grains in the ear was observed in the Znatnyy variety – 23.4 pcs. All the studied source material had high resistance to phytopathogens and lodging. The new varieties identified in the research

process are a valuable source material for the development of new highly competitive varieties of spring barley for the conditions of the Central region of Russia.

Keywords: *Hordeum vulgare* L., *new variety, productivity, crop structure, hydrothermal conditions, correlation relationship*

Acknowledgements: the research was carried out under the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM (theme No. 0581-2019-0021).

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

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

For citation: Levakova O. V. New sources of agronomic traits of spring barley for the conditions of the southern zone of the Central region of the Russian Federation. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2024;25(1):27–34. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.1.27-34

Received: 29.11.2022 Accepted for publication: 22.01.2023 Published online: 28.02.2024

Одним из основных способов создания сортов сельскохозяйственных культур до сих пор остается гибридизация с последующим отбором рекомбинантных генотипов с ярко выраженным комплексом селекционно-ценных признаков [1].

Нестабильность и непредсказуемость природно-климатических факторов в период вегетации, сложность взаимодействия сорта со средой вносят коррективы в модели сортов, что указывает на необходимость постоянного поиска новых селекционных источников с подходящими к меняющимся условиям признаками [2, 3, 4].

Использование ограниченного набора родительских форм сужает наследственное разнообразие создаваемых сортов и обостряет проблему их устойчивости к неблагоприятным абиотическим факторам среды [5, 6]. Таким образом, вовлечение в скрещивания образцов различного эколого-географического происхождения является необходимым условием получения ценного селекционного материала для создания адаптивных сортов, сочетающих урожайность с устойчивостью к биотическим и абиотическим стрессам [7].

Актуальная на сегодняшний день проблема изучения взаимодействия генотипа и среды включает оценку изменчивости отдельных элементов продуктивности и их вклад в стабилизацию урожайности [8, 9]. Ряд ученых связывают проявление количественных признаков продуктивности и ее структурных элементов с генотипом сортов ячменя ярового, в результате скрещивания которых были созданы новые ценные сорта для различных условий выращивания [10, 11, 12].

Успешная реализация селекционных программ по созданию инновационных сортов тесно связана с использованием нового исходного материала [13].

В связи с этим, выявление новых генетических источников ячменя ярового по параметрам продуктивности и стабильности признаков для создания сортов, адаптированных к непредсказуемым факторам внешней среды южной зоны Центрального региона Нечерноземной зоны РФ, куда входит и территория Рязанской области, становится все более актуальной задачей.

Цель исследований – изучить в условиях Рязанской области (южная зона Центрального региона Нечерноземной зоны РФ) новый сортимент ячменя ярового и выявить источники селекционно-ценных признаков для дальнейшего использования их в гибридизации.

Научная новизна – выявлены новые источники селекционно-ценных признаков ячменя ярового по параметрам продуктивности и стабильности в условиях Центрального региона России.

Материал и методы. Наблюдение, изучение и сравнение 11 новых сортов ярового ячменя проводили в 2020-2022 гг. на полях Института семеноводства и агротехнологий – филиала ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ) в коллекционном питомнике лаборатории селекции и первичного семеноводства на естественном инфекционном фоне. Стандарт – районированный среднеспелый сорт ячменя ярового Надежный. Питомник закладывали в I декаде мая сеялкой СКФ-7М. Площадь делянки – 3 м^2, без повторений. Норма высева – 500 всхожих зерен на 1 м^2, предшественник – чистый пар.

Почвенный покров на опытном участке представлен темно-серой лесной тяжелосуглинистой почвой с содержанием органического вещества (ГОСТ 26213-91) – 5,60 %, азота нитратного (ГОСТ 26951-86) – 15,7 мг/кг, азота аммонийного (ГОСТ 26489-85) – 4,43 мг/кг, $pH_{сол.}$ (ГОСТ 26483-85) – 4,88 ед., подвижного фосфора (ГОСТ Р 54650-2011) – 378 мг/кг почвы, подвижного калия (ГОСТ Р 54650-2011) – 275,0 мг/кг почвы, обменного магния (ГОСТ 26487-85) – 2,16 ммоль/100 г почвы.

Под предпосевную культивацию вносили минеральные удобрения из расчета $N_{64}P_{64}K_{64}$ в виде азофоски N:P:K = 16:16:16 с помощью

навесного разбрасывателя минеральных удобрений РУМ-GL. В фазу кущения культуры проводили опрыскивание баковой смесью гербицидов (Балерина, СЭ – 0,4 л/га + Магнум, ВДГ – 7 г/га) с добавлением инсектицида Борей, СК – 0,1 л/га.

Анализ структуры урожая, степень модификационной изменчивости признака (коэффициенты вариации (CV, %), сопряженность признака с урожайностью (коэффициент корреляции, *r*) проведены с использованием соответствующих для данных исследований методик[1], статистическую обработку данных осуществляли с помощью компьютерных программ Microsoft Office Excel и Diana. Оценку устойчивости к болезням проводили в полевых условиях на естественном инфекционном фоне по методике ВИР[2].

Качественные показатели зерна исследуемых сортов (содержание белка) определяли методом инфракрасной спектроскопии на анализаторе цельного зерна Infratec 1241.

Для оценки складывающихся гидротермических условий использовали данные по количеству осадков и температуре, полученные на метеостанции Института семеноводства и агротехнологий. Гидротермический коэффициент (ГТК) рассчитывали по Г. Т. Селянинову[3].

Погодные условия в период исследований были нестабильны и это позволило достаточно объективно провести анализ изучаемых сортов по показателям урожайности и ее структурных компонентов.

Вегетационный период 2020 года характеризовался достаточным увлажнением (ГТК = 1,34) и оптимальным температурным режимом. Условия I декады мая были удовлетворительными для появления всходов, среднемесячная температура воздуха в данный период составляла 14,7 °С, что выше на 4,0 °С среднемноголетних значений, осадков выпало 27,7 мм, на 151,8 % больше среднемноголетних значений. Максимальная температура воздуха в отдельные дни достигала 25,0 °С. Фазы «кущение» и «начало стеблевания» (II и III декады мая) проходили при умеренной температуре и достаточном количестве влаги. Такие комфортные условия способствовали хорошему кущению растений зерновых культур и формированию мощной вегетативной массы. В I декаде июня отмечали прохладную погоду с интенсивным увлажнением (осадков в этот период выпало 71 мм, что в 4,5 раза больше среднемноголетних значений, ГТК = 3,9). Обильные осадки спровоцировали раннее полегание растений. В I и II декадах июля ГТК составил 0 и 0,14 соответственно, и среднемесячная температура воздуха была на 5,5–8,5 °С выше среднемноголетних значений. В экстремально засушливых условиях I и II декад июля проходил период развития растений от выхода в трубку до колошения. Основная масса атмосферных осадков (29 мм) выпала в конце III декады месяца.

Вегетационный период 2021 года (ГТК = 0,7) характеризовался аномально жарким маем (среднесуточная температура составляла более 27,0 °С). В первой половине июня отмечена дождливая и умеренно прохладная погода. За этот период осадков выпало 69,1 мм, что позволило растениям сформировать мощную вегетативную массу. Вторая половина июня проходила в экстремально жарких условиях, среднесуточная температура воздуха превышала норму на 7,0–11,0 °С, что способствовало более быстрому прохождению фазы «колошение» сортообразцов ярового ячменя. В июле стояла жаркая сухая погода. Основная масса осадков выпала в конце месяца, ГТК = 0,5. Во II декаде июля среднемесячная температура воздуха была на 10,7 °С выше среднемноголетних значений. Дневные максимальные температуры достигали 34,0–35,0 °С, а среднесуточные – 30,9–31,7 °С. Вследствие этого, развитие растений проходило в экстремально жарких условиях, превышающих норму, что способствовало более быстрому созреванию сортообразцов.

Вегетационный период 2022 года был засушливым (ГТК = 0,53). Температура I декады мая была умеренно теплой (4,2 °С), что позволило подготовить почву к посеву, несмотря на большое выпадение осадков (превышение нормы более чем в 2 раза – 22,3 мм). Фазы «кущение» и «начало стеблевания» ячменя проходили в оптимальных по температурному режиму и увлажнению условиях. Аналогичными метеоусловиями характеризовалась III декада мая. Температурный режим июня сложился оптимальным для роста и развития ярового ячменя, осадков выпало меньше среднемноголетних

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

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

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

значений на 21,7 % (40,7 мм). В июле температурный режим был повышенным, дневные температуры достигали 28…34 °С. В I декаде месяца осадки отсутствовали, II и III декады характеризовались малым количеством осадков – 33,2–39,5 % от среднемноголетней нормы. Средняя температура за месяц составила 24,0 °С, сумма осадков – 16 мм. В связи с повышенными температурами уже в начале III декады месяца у растений ярового ячменя отмечена фаза «молочная спелость», в конце месяца – «молочно-восковая спелость».

Уборку урожая проводили комбайном «Сампо-130» в фазу полной спелости ячменя в теплую и сухую погоду во все годы исследований.

Результаты и их обсуждение. Процесс создания селекционно-генетического разнообразия для эффективного отбора осуществляется на основе тщательного подбора компонентов для скрещивания после их испытания в конкретных почвенно-климатических условиях.

Все исследуемые в опыте сорта имели двурядный колос и характеризовались среднеспелостью (вегетационный период 81–87 суток).

В результате исследования в коллекционном питомнике новых сортов ярового ячменя, относящихся к различным эколого-географическим группам, выявлены сортовые различия в продуктивности (табл. 1).

Таблица 1 – **Урожайность и содержание белка в зерне новых районированных сортов ячменя различного эколого-географического происхождения (2020–2022 гг.)**
Table 1 – **Yield and protein content in grain of new zoned barley varieties of various ecological and geographical origin (2020-2022)**

Название сорта / Name of the variety	*Происхождение / Origin*	*Год районирования / Year of zoning*	*Регион допуска / Admission regions*	*Высота растений, см / Plant height, cm*	*Урожайность, т/га / Yield, t/ha*	*Содержание белка, % / Protein, %*
Надежный, ст. / Nadezhnyy, st.	Россия / Russian Federation	2017	2, 3, 4, 7	67–73 70	5,50–7,50 6,29	11,9–13,9 12,79
Знатный / Znatnyy		2020	3	73–85 78	5,34–7,53 6,38	13,59–14,46 14,10
Памяти Чепелева / Pamyati Chepeleva		2016	3, 4, 7, 9, 10	70–80 77	3,27–7,46 5,00	14,40–15,90 15,31
Куфаль / Kufal	Беларусь / Belarus	2019	-	70–75 73	4,23–7,38 5,98	13,83–15,26 14,61
Рейдер / Raider		2019	3	70–77 73	2,97–6,65 5,03	13,11–14,69 13,94
КВС Харрис / KWS Harris	Германия / Germany	2019	2, 3	58–80 69	4,90–6,69 5,50	11,46–13,12 12,43
КВС Вермонт / KWS Vermont		2019	5	65–72 67	3,90–7,98 5,74	12,85–13,46 13,17
Бенте / Bente		2018	4	63–80 72	4,23–5,17 4,70	12,42–14,58 13,39
Эллинор / Ellinor		2020	2, 3, 5	61–66 63	5,81–6,22 6,02	11,25–13,36 12,31
ЛГ Набуко / LG Nabuko	Франция / France	2019	3	68–79 72	3,27–6,46 4,54	12,65–14,01 13,38
Рапид / Rapid		2020	3	65–80 71	4,75–7,53 5,78	11,67–13,43 12,69
Лауреате / Laureate	Швейцария / Switzerland	2019	3, 5	65–78 72	1,87–7,31 4,59	13,52–13,54 13,49
Коррелируемые с урожайностью показатели, *r* / Correlation with yield, *r*						
2020 г.		-	-	0,126	-	-0,234
2021 г.		-	-	0,335*	-	-0,064
2022 г.		-	-	0,452*	-	-0,211
Корреляция со средней урожайностью за 2020–2022 гг. / Correlation with average yield for 2020–2022				-0,145	-	-0,123

Примечания: *Доверительная вероятность при P ≥ 0,95, числитель – минимальное и максимальное значения, знаменатель – среднее значение /

Notes: *Confidence probability P≥0.95, above the line is the minimum and maximum value, below the line is the average value

Максимальные показатели по урожайности получены в 2022 году, минимальные – в 2020 году.

Анализ данных таблицы 1 показывает, что среди нового сортимента наибольшей средней урожайностью за годы исследований (на уровне стандарта) обладал сорт отечественной селекции Знатный – 6,38 т/га: преимущество по сравнению с германскими сортами составило 5,6–26,3 %, французскими – 9,4–28,8 %, белорусскими – 6,3–26,8 % и швейцарским сортом Лауреате – 28,1 %.

По полученной максимальной урожайности за годы исследований (7,0 т/га и более) изученные сорта расположились в следующем порядке: КВС Вермонт (7,98 т/га), Знатный (7,53 т/га), Рапид (7,53 т/га), Памяти Чепелева (7,46 т/га), Куфаль (7,38 т/га) и Лауреате (7,31 т/га).

Нестабильным по продуктивности отмечен высокоурожайный сорт Лауреате, который в неординарных условиях 2020 года сформировал самую низкую урожайность – 1,87 т/га.

В качестве низкорослых форм из новейшего сортимента сортов рекомендуется вовлекать в селекционный процесс новые германские сорта КВС Вермонт и Эллинор, высота которых находится в пределах 63–67 см и мало изменяется по годам исследований (CV, % = 3,9–6,0). При планировании селекционной работы необходимо учитывать, что высота растений положительно влияет на урожайность культуры в засушливые годы (r = 0,335…0,452).

Различия по качеству зерна позволяют выделить сорта, наиболее ценные для селекции. Главный показатель качества – содержание белка в зерне, наименьшим количеством которого характеризовались сорта Эллинор (12,31 %), КВС Харрис (12,43 %) и Рапид (12,69 %). Данные сорта можно использовать в селекционной работе для снижения уровня белка в зерне (пивоваренные цели).

Залогом рационального питания человека и продуктивного кормления животных является оптимально высокое содержание белка в продуктах и кормах. В целях повышения качества фуража выделена группа высокобелковых сортов ячменя: Памяти Чепелева (15,31 %), Куфаль (14,61 %), Знатный (14,10 %).

Анализ количественных признаков исследуемого сорттимента показал, что сорт Знатный имеет преимущество по количеству зерен в колосе – 23,4 шт. (CV, % = 4,0) и массе зерна с колоса – 1,16 г (CV, % = 6,8). По длине колоса выделились Бенте (8,2 см) и Знатный (8,0 см). Все исследуемые сорта имели незначительное рассеивание по данному признаку (CV, % < 10,0), кроме Лауреате (CV, % = 10,6), сорт Бенте характеризовался самым стабильным показателем длины колоса (CV, % = 0,6) (табл. 2).

Проведенный корреляционный анализ показал, что такие структурные показатели, как длина колоса и количество зерен в колосе оказывают положительное влияние на урожайность культуры – r = 0,301…0,317. Особенно тесная достоверная связь с урожайностью отмечена во влажный 2020 год (r = 0,531…0,609).

Выявлены прямые взаимозависимости между длиной колоса и количеством зерен в нем (r = 0,597), а также между длиной колоса и его продуктивностью (r = 0,477).

Наибольшей продуктивной кустистостью обладали сорта Памяти Чепелева и Лауреате – 4,0 и 4,4 соответственно. Однако у сорта Памяти Чепелева данный признак крайне нестабилен по годам исследований (CV, % = 38,3), в отличие от других сортов, имеющих по нему среднее варьирование (CV, % = 10…20). В сухие годы, когда растения ячменя имели оптимальную вегетативную массу, данный показатель влиял на урожайность ячменя (r = 0,380…0,491).

Масса 1000 зерен за годы наших исследований характеризовалась высокими значениями – в среднем от 44,3 до 50,3 г. Высокой крупностью зерна (50,0 г и более) отмечены сорта Куфаль, Рейдер, Бенте. Установлено, что в год с выпадением большого количества осадков (2020) значение показателей «масса зерна с колоса» и «масса 1000 зерен» ячменя уменьшались вследствие полегания растений. У сортов Памяти Чепелева, КВС Вермонт, Эллинор, ЛГ Набуко, Рапид и Лауреате «масса 1000 зерен» составила менее 40,0 г. Бóльшая часть исследованных сортов по крупности зерна имела среднее варьирование (CV, % = 10…20), сорта КВС Вермонт, Рапид, ЛГ Набуко и Лауреате – сильное (CV, % = 22,7…26,2).

Весь исследуемый новый сортимент исходного материала имел высокую устойчивость к фитопатогенам на уровне 6,9–8,7 балла и полеганию – 7,3–8,0 баллов (табл. 3).

Заключение. В условиях Рязанской области (южная зона Центрального региона Нечерноземной зоны РФ) изучен новый сортимент ячменя ярового по комплексу селекционно-ценных признаков.

Таблица 2 – **Количественные характеристики нового сортимента ячменя ярового (2020–2022 гг.) /**
Table 2 **– Quantitative characteristics of the new assortment of spring barley (2020–2022)**

Название сорта / Name of the variety	*Продуктивная кустистость / Productive bushiness*	*Длина колоса, см / Ear length, cm*	*Кол-во зерен в колосе, шт. / Number of grains per ear, pcs.*	*Масса зерна с колоса, г / Grain weight per ear, g*	*Масса 1000 зерен, г / Weight of 1000 grains, g*
Надежный, стандарт / Nadezhnyy, standard	3,0–5,5 3,9	6,3–7,2 6,5	18,4–20,4 19,7	0,70–1,01 0,90	37,9–50,5 44,1
Знатный / Znatnyy	2,4–3,6 3,0	7,5–8,3 8,0	22,5–24,4 23,4	1,10–1,25 1,16	40,7–50,8 44,3
Памяти Чепелева / Pamyati Chepeleva	3,0–5,8 4,0	7,3–8,0 7,6	20,8–23,2 21,7	1,06–1,10 1,08	37,7–52,9 44,5
Куфаль / Kufal	2,5–3,8 3,2	7,3–7,4 7,4	18,9–21,3 20,1	0,95–1,27 1,11	41,3–58,8 50,0
Рейдер / Raider	2,4–5,0 3,6	6,9–8,1 7,5	19,7–21,0 20,5	1,10–1,16 1,12	45,5–56,2 50,3
КВС Харрис / KWS Harris	3,0–4,1 3,4	7,2–8,5 7,9	21,2–24,2 22,1	1,02–1,30 1,13	44,8–53,5 47,8
КВС Вермонт / KWS Vermont	3,0–4,0 3,3	6,9–7,7 7,4	20,5–22,8 21,5	0,94–1,30 1,09	36,5–56,8 44,8
Бенте / Bente	2,5–4,8 3,7	8,1–8,2 8,2	21,2–21,3 21,3	1,0–1,21 1,11	42,6–57,8 50,2
Эллинор / Ellinor	2,5–3,3 2,9	6,6–7,5 7,1	18,5–20,6 19,6	0,97–0,98 0,98	36,5–52,4 44,5
ЛГ Набуко / LG Nabuko	3,0–4,5 3,6	6,9–7,6 7,2	18,7–20,7 19,7	0,87–1,07 1,0	36,2–57,1 46,1
Рапид / Rapid	3,2–5,1 3,9	7,3–8,0 7,7	19,6–20,5 20,2	0,94–1,19 1,03	35,1–57,8 45,4
Лауреате / Laureate	3,7–5,0 4,4	5,5–6,8 6,2	19,7–20,6 20,2	0,9–1,24 1,07	35,0–59,9 47,5
Коррелируемые с урожайностью показатели, *r* / Correlation with yield, *r*					
2020 г.	-0,651*	0,609*	0,531*	0,120	0,012
2021 г.	0,491*	0,165*	-0,120	-0,121	-0,201
2022 г.	0,380*	0,030*	0,355*	0,389*	-0,027
Корреляция со средней урожайностью за 2020–2022 гг. / Correlation with average yield for 2020–2022	-0,745*	+0,301*	0,317*	0,178	-0,374*

Примечания: *Доверительная вероятность при P ≥ 0,95, числитель – минимальное и максимальное значения, знаменатель – среднее значение /

Notes: *Confidence probability P≥0.95, above the line is the minimum and maximum value, below the line is the average value

Наибольшую среднюю урожайность за годы исследований (2020–2022) имели сорта Знатный (Россия) – 6,38 т/га, Эллинор (Германия) – 6,02 т/га и Куфаль (Беларусь) – 5,98 т/га. В качестве низкорослых форм рекомендуется вовлекать в селекционный процесс германские сорта КВС Вермонт и Эллинор, высота которых находится в пределах 63-67 см и мало изменяется по годам исследований (CV, % = 3,9…6,0). Наименьшим содержанием белка в зерне характеризовались германские сорта Эллинор (12,31 %), КВС Харрис (12,43 %) и французский сорт Рапид (12,69 %). В целях повышения качества фуража выделена группа высокобелковых сортов ячменя: Памяти Чепелева (15,31 %), Знатный (14,10 %) (Россия), Куфаль (14,61 %) (Беларусь). По длине колоса отмечены сорта Бенте (Германия) – 8,2 см и Знатный – 8,0 см. Максимальную продуктивную кустистость имели сорта Памяти Чепелева (Россия) – 4,0 и Лауреате (Швейцария) – 4,4. Наибольшее количество зерен в колосе получено у сорта Знатный (Россия) – 23,4 шт. Весь исследуемый исходный материала имел высокую устойчивость к фитопатогенам и полеганию.

Таблица 3 – **Устойчивость нового сортимента ячменя ярового к фитопатогенам и полеганию (2020–2022 гг.) /**
Table 3 **– Resistance of a new assortment of spring barley to phytopathogens and lodging (2020–2022)**

Название сорта/ Name of the variety	*Устойчивость, балл / Resistance, points*			*Поражение пыльной головней, % / Loose smut infection, %*	*Устойчивость к полеганию, балл / Resistance to lodgin, points*
	мучнистая роса / powdery mildew	*темно-бурая пятнистость / dark brown spotting*	*сетчатая пятнистость / barley net blotch*		
Надежный, стандарт / Nadezhnyy, standard	8,5	7,5	8,0	0,04	8,5
Знатный / Znatnyy	8,5	7,8	8,0	0	8,0
Памяти Чепелева / Pamyati Chepeleva	8,3	7,0	8,0	0,1	7,7
Куфаль / Kufal	8,5	7,5	8,0	0,01	8,0
Рейдер / Raider	8,5	7,3	8,3	0,01	8,0
КВС Харрис / KWS Harris	8,7	7,3	7,0	0	7,3
КВС Вермонт / KWS Vermont	8,5	7,3	8,0	0,01	8,0
Бенте / Bente	8,5	7,5	7,0	0	8,0
Эллинор / Elinor	8,5	8,0	7,5	0,20	8,0
ЛГ Набуко / LG Nabuko	8,5	7,0	7,7	0	8,0
Рапид / Rapid	8,7	6,9	7,0	0	8,0
Лауреате / Laureate	8,6	8,0	8,0	0,05	8,0

Сорта ярового ячменя, выделившиеся как по отдельным селекционно-значимым признакам, так и по их комплексу, являются ценным исходным материалом при создании новых высококонкурентных сортов ячменя ярового для условий Центрального региона России.

Список литературы

1. Пискарев В. В., Зуев Е. В., Брыкова А. Н. Исходный материал для селекции яровой 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

2. Левакова О. В. Изучение исходного материала ярового ячменя в целях использования его в селекционном процессе для центрального региона РФ. Зернобобовые и крупяные культуры. 2018;(2):61–65. DOI: https://doi.org/10.24411/2309-348X-2018-10018 EDN: XPIJFZ

3. Усатов А. В., Устенко А. А., Горбаченко О. Ф., Денисенко Ю. В. Влияние климатических факторов на изменчивость хозяйственно ценных признаков подсолнечника в Приазовской зоне Ростовской области. Современные проблемы науки и образования. 2012;(1):207. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17688832 EDN: NKNHQK

4. Федюшкин А. В., Парамонов А. В., Медведева В. И. Влияние систематического внесения удобрений на урожайность и качество ярового ячменя. Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2018;(4(72)):81–84. Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=35553571 EDN: XYKUIH

5. Филенко Г. А., Васильченко С. А., Донцов Д. П. Продуктивность сорта ярового ячменя Леон в зависимости от метеоусловий в южной зоне Ростовской области. Зерновое хозяйство России. 2017;(1(49)):43–49. Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=28825295 EDN: YGUJRX

6. Hulsbergen K. J., Feil B., Diepenbrock W. Rates of nitrogen application required to achieve maximum energy efficiency for various crops: results of a long-term experiment. Field Crops Research. 2002;77(1):61–76. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=1087207

7. Кокина Л. П., Щеклеина Л. М., Кунилова А. В. Источники селекционно-ценных признаков и их использование в создании адаптивных к условиям Волго-Вятского региона сортов ячменя. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2017;(3(58)):9–14. DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2017.58.3.09-14 EDN: YOQWWB

8. Abdorreza J., Hossein S. G., Morteza N. Relationship between agronomic and morphological traits in barley varieties under drought stress condition. International Research Journal of Applied and Basic Sciences. 2015;(9(9)):1507–1511. URL: https://www.researchgate.net/publication/353122030_Relationship_between_agronomic_and_morphological_traits_in_barley__varieties_under_drought_stress_condition

9. Левакова О. В. Вариабельность элементов структуры урожая ярового ячменя в зависимости от гидротермических условий вегетации. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2022;23(3):327–333. DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2022.23.3.327-333 EDN: BSOZZS

10. Батакова О. Б., Корелина В. А. Влияние элементов структуры урожая на продуктивность ячменя ярового (*Horbeum vulgare* L.) в условиях Крайнего Севера РФ. Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2017;178(3):50–58. DOI: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2017-3-50-58

11. Павлова О. В., Марченкова Л. А., Чавдарь Р. Ф., Орлова Т. Г., Савоськина О. А. Оценка сортов зерновых культур по показателям качества семян и стрессоустойчивости. Владимирский земледелец. 2021;(2):52–57. DOI: https://doi.org/10.24412/2225-2584-2021-2-52-57 EDN: KHMTBN

12. Байкалова Л. П., Серебрянников Ю. И. Роль сорта в повышении урожайности ячменя в условиях лесостепи Красноярского края. Вестник КрасГАУ. 2016;(7):167–172. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26273331 EDN: WCYKTH

13. Левакова О. В., Ерошенко Л. М. Новый сорт ярового ячменя Знатный. Аграрная наука. 2020;(9):80–83. DOI: https://doi.org/10.32634/0869-8155-2020-341-9-80-84 EDN: YTYYYT

References

1. 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 selektsii* = Vavilov Journal of Genetics and Breeding. 2018;22(7):784–794. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.18699/VJ18.422

2. Levakova O. V. Study of the spring barley source material for use in the selection process for the central region of the russian federation. *Zernobobovye i krupyanye kul'tury* = Legumes and Groat Crops. 2018;(2):61–65. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.24411/2309-348X-2018-10018

3. Usatov A. V., Ustenko A. A., Gorbachenko O. F., Denisenko Yu. V. The influence of climatic factors on the variability of sunflower agronomic characters in Azov of Rostov region. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* = Modern problems of science and education. 2012;(1):207. (In Russ.). URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17688832

4. Fedyushkin A. V., Paramonov A. V., Medvedeva V. I. Effect of systematic application of fertilizers on the yields and quality of spring barley grain. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Izvestia Orenburg State Agrarian University**.** 2018;(4(72)):81–84. (In Russ.). URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=35553571

5. Filenko G. A., Vasil'chenko S. A., Dontsov D. P. Productivity of the spring barley variety 'Leon' in dependence of weather conditions of the southern part of the Rostov region. *Zernovoe khozyaystvo Rossii* = Grain Economy of Russia. 2017;(1(49)):43–49. (In Russ.). URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=28825295

6. Hulsbergen K. J., Feil B., Diepenbrock W. Rates of nitrogen application required to achieve maximum energy efficiency for various crops: results of a long-term experiment. Field Crops Research. 2002;77(1):61–76. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=1087207

7. Kokina L. P., Shchekleina L. M., Kunilova A. V. Sources of valuable breeding traits and their use in creation of barley varieties adapted to conditions of Volga-Vyatka region. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2017;(3(58)):9–14. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2017.58.3.09-14

8. Abdorreza J., Hossein S. G., Morteza N. Relationship between agronomic and morphological traits in barley varieties under drought stress condition. International Research Journal of Applied and Basic Sciences. 2015;(9(9)):1507–1511. URL: https://www.researchgate.net/publication/353122030_Relationship_between_agronomic_and_morphological_traits_in_barley_varieties_under_drought_stress_condition

9. Levakova O. V. Variability of the elements of spring barley yield structure depending on the hydrothermal conditions of vegetation. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2022;23(3):327–333. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2022.23.3.327-333

10. Batakova O. B., Korelina V. A. The effect of yield structure elements on spring barley (*Hordeum vulgare* L.) productivity in the environments of Russia's extreme north. *Trudy po prikladnoy botanike, genetike i selektsii* = Proceedings on applied botany, genetics and breeding. 2017;178(3):50–58. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2017-3-50-58

11. Pavlova O. V., Marchenkova L. A., Chavdar R. F., Orlova T. G., Savoskina O. A. Assessment of grain crops on seed quality and resistance to unfavourable conditions. *Vladimirskiy zemledelets* = Vladimir agricolist. 2021;(2):52–57. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.24412/2225-2584-2021-2-52-57

12. Baykalova L. P., Serebryannikov Yu. I. Rol' sorta v povyshe-nii urozhaynosti yachmenya v usloviyakh lesostepi Krasnoyarskogo kraya. *Vestnik KrasGAU* = The Bulletin of KrasGAU. 2016;(7):167–172. (In Russ.). URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26273331

13. Levakova O. V., Eroshenko L. M. A new variety of spring barley is Znatny. *Agrarnaya nauka* = Agrarian science. 2020;(9):80–83. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.32634/0869-8155-2020-341-9-80-84

Сведения об авторе

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

Information about the author

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

✉ – Для контактов / Corresponding author

https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.1.35-42
УДК 633.111.1:631.52

(cc) BY

Адаптивные свойства и экологическая пластичность перспективных линий яровой мягкой пшеницы в условиях Центрального Нечерноземья России

© 2024. Т. А. Барковская ✉, О. В. Гладышева
ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», г. Москва, Российская Федерация

В условиях Рязанской области изучали (2020–2023 гг.) адаптивные свойства и экологическую пластичность 8 селекционных линий яровой мягкой пшеницы (стандарт – сорт Агата) по признаку «урожайность» с использованием разноплановых статистических методов. Экологическую пластичность (b_i), стабильность (σ^2_d), индекс условий среды (I_j) определяли по S. A. Eberhart, W. A. Russell, вариацию – по Б. А. Доспехову, устойчивость к стрессу и генетическую гибкость – по A. A. Rossielle, J. Hemblin, индекс экологической пластичности – по А. А. Грязнову, показатель уровня стабильности урожайности сорта – по Э. Д. Неттевичу, гомеостатичность (H_{om}), селекционную ценность (Sc) – по В. В. Хангильдину, относительную стабильность, критерий стабильности – по Н. А. Соболеву, мультипликативность (КМ) – по В. А. Драгавцеву. Установлено, что на уровень урожайности определяющее влияние оказывает фактор «среда» – 51,5 %, вклад фактора «генотип» – 11,5 %. Средняя урожайность в опыте составила 5,19 т/га, благоприятные условия 2022 г. (I_j = 0,50) позволили сформировать урожайность на 17,9 % выше, чем в 2021 г. (I_j = -0,52). Высокой урожайностью отличались линии 2-17 (6,24 т/га) и 21-17 (6,05 т/га), показатель генетической гибкости у них составил 5,58 и 5,41 т/га соответственно. Линии 1-17, 465-17 и 531-17 обладали наибольшей устойчивостью к стрессу (-0,63, -1,00), для них характерна высокая стабильность урожайности (σ^2_d = 0,27–0,65) и наименьшее снижение ее в неблагоприятных условиях. Сильная отзывчивость на изменение условий среды отмечена у линий 290-17, 2-17 и 21-17: b_i – 1,25–1,29, КМ – 2,22–2,27. По степени гомеостатичности выделилась линия 1-17 (Sc – 4,63, ПУСС – 212, H_{om} – 18,3), данные показатели превышали среднесортовые значения на 10,2 %, 81,0 абс. %, 98,9 % соответственно. По результатам интегрированной оценки методом ранжирования, селекционные линии 1-17, 465-17 и 21-17 проявили различную степень адаптивности, экологической устойчивости, гомеостатичности и обладали высоким рейтингом. Самый низкий рейтинг по сумме рангов параметров адаптивности и пластичности получил стандартный сорт Агата.

Ключевые слова: *Triticum aestivum* L., *линия, условия среды, показатели адаптации, гомеостатичность, рейтинг*

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (тема № FGUN2022-0013).
Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку данной работы.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов.

Для цитирования: Барковская Т. А., Гладышева О. В. Адаптивные свойства и экологическая пластичность перспективных линий яровой мягкой пшеницы в условиях Центрального Нечерноземья России. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2024;25(1):35–42. DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.1.35-42

Поступила: 29.12.2023 Принята к публикации: 12.02.2024 Опубликована онлайн: 28.02.2024

Adaptive properties and ecological plasticity of promising lines of spring soft wheat in the conditions of the Central Non-Black Earth Regions of Russia

© 2024. Tatyana A. Barkovskaya ✉, Olga V. Gladysheva
Federal Scientific Aroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

In the conditions of the Ryazan region, adaptive properties and ecological plasticity of 8 breeding lines of spring soft wheat (standard Agatha variety) were studied in 2020–2023 according to the "yield" trait using diverse statistical methods. Ecological plasticity (b_i), stability (σ^2_d), index of environmental conditions (I_j) were determined by S. A. Eberhart, W. A. Russell, variation – by B. A. Dospekhov, stress resistance and genetic flexibility – by A. A. Rossielle, J. Hemblin, index of ecological plasticity – by A. A. Gryaznov, indicator the level of the variety yield stability – according to E. D. Nettevich, homeostaticity (H_{om}), breeding value (Sc) – according to V. V. Hangildin, relative stability, stability criterion – according to N. A. Sobolev, multiplicativity (KM) – according to V. A. Dragavtsev. It has been established that the yield level is mostly influenced by the factor "environment" – 51.5 %, the contribution of the factor "genotype" is 11.5 %. The average yield in the experiment was 5.19 t/ha, favorable conditions in 2022 (I_j = 0.50) allowed the yield to be 17.9 % higher than in 2021 (I_j = -0.52). Lines 2-17 (6.24 t/ha) and 21-17 (6.05 t/ha) had high yields, their genetic flexibility index was 5.58 and 5.41 t/ha, respectively. Lines 1-17, 465-17 and 531-17 had the highest resistance to stress (-0.63, -1.00), they are characterized by high yield stability (σ^2_d = 0.27–0.65) and the least decrease in it under adverse conditions. Strong responsiveness to changes in environmental conditions was noted for lines 290-17, 2-17 and 21-17: b_i – 1.25–1.29, KM – 2.22–2.27. According to the degree of homeostaticity, line 1-17 was distinguished (Sc – 4.63, PUSS – 212, H_{om} – 18.3), these indicators exceeded the average values by 10.2 %, 81.0 abs. %, 98.9 %, respectively.

According to the results of the integrated assessment by the ranking method, breeding lines 1-17; 465-17 and 21-17 showed varying degrees of adaptability, environmental stability, homeostaticity and had a high rating. The lowest rating in terms of the sum of the ranks of adaptability and plasticity parameters was obtained by the standard Agate variety.

Key words: *Triticum aestivum* L., *line, environmental conditions, adaptation indicators, homeostaticity, rating*

Acknowledgments: the research was carried out under the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM (theme No. FGUN2022-0013).

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

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

For citation: Barkovskaya T. A., Gladysheva O. V. Adaptive properties and ecological plasticity of promising lines of spring soft wheat in the conditions of the Central Non-Black Earth Regions of Russia. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2024;25(1):35–42. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.1.35-42

Received: 29.11.2023 Accepted for publication: 12.02.2024 Published online: 28.02.2024

Фундаментальные исследования в области генетики и селекции являются мощной биологической основой роста продуктивности зерновых культур. Прирост валового сбора зерна на 50–70 % обусловлен внедрением новых сортов, при этом на повышение урожайности значительное влияние оказывают эффекты генотип-средового взаимодействия [1, 2, 3]. Экологическая ориентированность создаваемых генотипов во все времена волновала многих селекционеров, а в последнее годы этот вопрос наиболее актуален по причине расширения агрометеорологических факторов, негативно влияющих на урожайность сельскохозяйственных культур [4, 5, 6, 7]. В связи с этим, важная роль отводится созданию адаптивных форм растений, обладающих широким диапазоном реакции на изменяющиеся экологические условия, способных стабильно реализовать свои потенциальные возможности [8, 9, 10].

Для ведения целенаправленной селекции важны знания о соответствии продуктивности сортов зерновых культур критериям адаптивности и экологической пластичности [11, 12, 13]. Полученные данные позволят сделать вывод об уровне стабильности сортов к воздействию погодно-климатических условий и их отклике на улучшение условий выращивания.

Использование в современном растениеводстве агроэкологически адресных сортов позволит снизить воздействие негативных антропогенных факторов на окружающую среду и будет способствовать эффективному развитию сельскохозяйственного производства.

На конечных этапах селекционной работы необходимо оценивать перспективность отбора лучших фенотипов по раскрытию адаптивного потенциала в агроклиматических условиях ландшафта. Для этих целей необходим выбор различных алгоритмов статистических величин для определения приспособительных возможностей, позволяющих охарактеризовать специфику проявления генотипической способности [14, 15].

Цель исследования – определить адаптивные свойства и экологическую пластичность линий яровой мягкой пшеницы в условиях Рязанской области с использованием разноплановых статистических методов.

Новизна исследований. В агроклиматических условиях Рязанской области дана комплексная оценка новым перспективным линиям яровой мягкой пшеницы по раскрытию адаптивного потенциала, по сумме рангов параметров адаптивности и пластичности выявлены селекционные линии с высоким рейтингом.

Материал и методы. Исследования проводили в 2020–2023 гг. в Институте семеноводства и агротехнологий – филиал ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (ИСА – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ) (г. Рязань) в рамках конкурсного сортоиспытания. Уровень адаптивных свойств 8 перспективных линий яровой мягкой пшеницы оценивали по признаку «урожайность» (стандарт – сорт Агата).

Почвенный покров на опытном участке представлен темно-лесной тяжелосуглинистой почвой, содержание органического вещества – 4,95 %, подвижного фосфора – 213 мг/кг почвы, подвижного калия – 155 мг/кг почвы, общего азота – 0,228 %; $pH_{сол.}$ – 4,91 ед.

Температурный режим и влагообеспеченность вегетации различались как по годам, так и межфазным периодам развития культуры. Растения в 2020 году развивались в условиях обильных осадков – 220,4 мм (май, июнь, июль) с суммой активных температур – 1713,5 °С. Избыточное увлажнение (ГТК – 2,57–2,77) наблюдалось на ранних этапах онтогенеза культуры (от фазы всходов до выхода в трубку), в дальнейшем условия были оптимальными (ГТК – 0,95–0,79).

Условия 2021 года характеризовались сильной вариабельностью влагообеспеченности. Так, в межфазный период «кущение - выход в трубку» отмечалось избыточное увлажнение (ГТК – 2,23), в последующие фазы «выход в трубку - колошение» – засушливые условия (ГТК – 0,0–0,23). Длительная атмосферная засуха сократила межфазный период «колошение - созревание», что негативно повлияло на продуктивность линий яровой мягкой пшеницы. Сумма активных температур в 2021 году составила 1806 °С.

Умеренно прохладные условия в период закладки репродуктивных органов и развития пшеницы до фазы «колошение» в 2022 году обеспечили хорошее развитие растений. Среднесуточная температура в этот период составила 15,4–20,9 °С, ГТК – 0,71–0,84. Жаркий и сухой июль (ГТК – 0,21) никак не отразился на продуктивности культуры. Сумма активных температур в 2022 году – 1712,6 °С.

В 2023 году во время кущения растений выпало 35,0 мм осадков, ГТК составил 0,87, что в целом было оптимально для начального периода развития. В дальнейшем нарастала засушливость, от фазы «выход в трубку» до фазы «колошение» ГТК составил 0,13, только к фазе «налив зерна» (июль) выпали осадки (ГТК – 1,22). Сумма активных температур в 2023 году – 1755,3 °С.

Экологическую пластичность (коэффициент линейной регрессии b_i), стабильность урожайности (σ^2_d) и индекс условий среды (I_j) определяли по методике S. A. Eberhart и W. A. Russell в изложении В. А. Зыкина[1], устойчивость к стрессу (Y_{min} - Y_{max}) и генетическую гибкость ((Y_{max} + Y_{min}) /2) – по A. A. Rossielle и J. Hemblin в изложении А. А. Гончаренко[2], индекс экологической пластичности (ИЭП) – по А. А. Грязнову[3], показатель уровня стабильности урожайности сорта (ПУСС) – по Э. Д. Неттевичу[4] с соавторами, гомеостатичность (H_{om}), селекционную ценность (Sc) – по В. В. Хангильдину[5], относительную стабильность (St^2) и критерий стабильности (А) – по Н. А. Соболеву[6], коэффициент мультипликативности (КМ) – по В. А. Драгавцеву[7]. Статистическую обработку данных урожайности и ранжирование материала по величине параметров адаптивности и пластичности проводили по Б. А. Доспехову[8], при этом лучшему показателю соответствовала единица.

Результаты и их обсуждение. Главным критерием достоинства сорта является его продуктивность. Результаты двухфакторного дисперсионного анализа данных по урожайности селекционных линий яровой мягкой пшеницы выявили достоверность различий между эффектами генотипов, среды и их взаимодействия ($F_ф > F_т$). Установлено, что основным фактором, влияющим на формирование продуктивности, в наших исследованиях являлись условия внешней среды – 51,5 %, роль генотипа составила 11,5 % (табл. 1).

В результате исследований определен индекс условий среды (I_j), который показывает влияние средовых ситуаций на реализацию потенциала продуктивности линий яровой пшеницы в определенном году. Наиболее благоприятные условия для развития культуры сложились в 2022 году (I_j = 0,50) – средняя урожайность линий составила 5,69 т/га, что на 17,9 % больше 2021 года с менее благоприятными условиями (I_j = -0,52). В 2022 году наибольшей урожайностью обладали линии 21-17 и 2-17 – 6,05 и 6,24 т/га соответственно (табл. 2).

[1]Зыкин В. А., Белан И. А., Юсов В. С., Корнева С. П. Методика экологической пластичности сельскохозяйственных растений. Омск, 2008. 35 с.

[2]Гончаренко А. А. Об адаптивности и экологической устойчивости сортов зерновых культур. Вестник Россельхозакадемии. 2005;(6):49–53.

[3]Грязнов А. А. Карабалыкский ячмень. Кустанай, 1996. 448 с.

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

[5]Хангильдин В. В. Параметры оценки гомеостатичности сортов и селекционных линий в испытании колосковых культур. Научно-технический бюллетень ВСГИ. 1986;(2(60)):36–41.

[6]Соболев Н. А. Проблема отбора и оценки селекционного материала. Киев, 1980. С. 100–106.

[7]Драгавцев В. А., Цильке В. А., Рейтер Б. Г. Генетика признаков продуктивности яровой пшеницы в Западной Сибири. Новосибирск,1984. 229 с.

[8]Доспехов Б. А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М., 2012. 352 с.

Таблица 1 – **Результаты дисперсионного анализа по влиянию изучаемых факторов и их взаимодействия на урожайность линий яровой мягкой пшеницы в конкурсном сортоиспытании (2021-2022 гг.) /**
Table 1 – **Results of analysis of variance on the influence of the studied factors and their interaction on the yield of spring soft wheat lines in competitive variety testing (2021-2022)**

Источник варьирования / Source of variation	*Сумма квадратов (SS) / Sum of squares (SS)*	*Степень свободы (DF) / Degree of freedom (DF)*	*Средний квадрат (MS) / The middle square (MS)*	$F_{факт}$ / F_{fact}	F_m / F_t	*Доля влияния фактора, % / The share of the factor's influence, %*
Общее / General	39,54	144	-	-	-	100,0
Повторение / Repetition	0,83	3	-	-	-	-
Фактор А (генотип) / Factor A (genotype)	4,55	8	0,57	9,5*	1,9	11,5
Фактор В (среда) / Factor B (environment)	20,37	3	6,79	113,2*	2,7	51,5
Взаимодействие А х В / Interaction A x B	7,96	24	0,33	5,5*	1,6	20,1
Остаток / Remains	5,83	106	0,06	-	-	-

*Статистически значим при уровне вероятности $P \geq 0,95$ /
*Statistically significant at $P \geq 0.95$

Таблица 2 – **Урожайность линий яровой мягкой пшеницы, т/га (2020–2023 гг.) /**
Table 2 – **Productivity of spring soft wheat lines, t/ha (2020–2023)**

Сорт, линия / Variety, line	*2020 г.*	*2021 г.*	*2022 г.*	*2023 г.*	*Среднее (X±m) / Average (X±m)*	*Коэффициент вариации (CV), % / Coefficient of variation (CV), %*
Агата, ст. / Agatha, st.	4,64	4,72	5,75	4,88	5,00±0,28	11,2
21-17	5,42	4,77	6,05	4,95	5,30±0,29	11,0
2-17	5,33	4,92	6,24	5,00	5,37±0,32	11,9
1-17	5,48	4,85	5,45	5,13	5,23±0,15	5,8
465 -17	5,71	4,71	5,13	5,22	5,19±0,21	7,9
290-17	5,11	4,53	5,84	5,00	5,12±0,27	10,7
428 -17	5,20	4,60	5,80	5,28	5,22±0,25	9,4
259-17	5,42	4,34	5,36	5,28	5,10±0,26	10,2
531 -17	5,49	4,62	5,58	5,05	5,19±0,22	8,5
Среднее по опыту / Average by experiment	5,31	4,67	5,69	5,09	5,19±0,21	-
Индекс условий среды / Environmental conditions index	+0,12	-0,52	+0,50	-0,10	-	-

Коэффициент вариации урожайности указывает на фенотипическую изменчивость признака, обусловленную экологическими факторами [11]. Вариабельность урожайности у линий находилась в пределах 5,8–11,9 %. Слабой изменчивостью данного признака обладали линии 1-17; 465-17 и 531-17.

Важной характеристикой адаптивных свойств сорта и его пластичности является показатель стрессоустойчивости (Y_{min} - Y_{max}), который указывает на диапазон приспособительных возможностей. У линий он варьировал от -0,63 до -1,32. Линии 1-17; 465-17 и 531-17 обладали наибольшей устойчивостью к стрессу (-0,63, -1,0), для них характерна высокая стабильность урожая (σ^2_d) – 0,27–0,65 и наименьшее снижение его в неблагоприятных условиях (табл. 3).

Таблица 3 – **Показатели адаптивности, пластичности и стабильности линий яровой мягкой пшеницы (2020–2023 гг.) /**
Table 3 – **Indicators of adaptability, plasticity and stability of spring soft wheat varieties and lines (2020–2023)**

Сорт, линия / Variety, line	Y_{min} - Y_{max}	$(Y_{max}+Y_{min})/2$	*ПУСС, %*	*Sc*	H_{om}	St^2	*A*	*ИЭП*	b_i	σ^2_d	*КМ*
Агата, ст. / Agatha, st	-1,11	5,20	100	4,03	8,7	0,94	2,11	0,96	0,90	0,46	1,97
21-17 /	-1,28	5,41	114	4,17	13,7	0,94	2,23	1,02	1,29	0,85	2,27
2-17	-1,32	5,58	108	4,23	5,5	0,92	2,23	1,03	1,29	0,81	2,26
1-17	-0,63	5,17	212	4,63	18,3	0,98	2,27	1,01	0,64	0,27	1,60
465 -17	-1,00	5,21	152	4,28	8,9	0,97	2,24	1,01	0,51	0,41	1,50
290-17	-1,31	5,19	109	3,97	7,1	0,94	2,20	0,99	1,25	0,78	2,22
428-17	-1,20	5,20	129	4,14	8,0	0,95	2,23	1,01	1,11	0,72	2,09
259-17	-1,08	4,88	113	4,09	8,0	0,95	2,19	0,98	1,00	0,87	2,02
531-17	-0,96	5,10	140	4,29	5,0	0,96	2,23	1,00	1,00	0,65	2,00
Среднее, (X) / Average, (X)	-1,10	5,22	131	4,20	9,2	0,95	2,21	1,00	1,00	0,65	1,98
Ошибка средней / Error from the average	0,07	0,06	11,6	0,06	1,40	0,006	0,02	0,34	0,09	0,07	0,09

Примечания: Y_{min} – урожайность минимальная; Y_{max} – урожайность максимальная; (Y_{min} - Y_{max}) – стрессоустойчивость; (Y_{max} + Y_{min})/2 – генетическая гибкость; ПУСС – показатель уровня стабильности сорта; Sc – селекционная ценность; H_{om} – гомеостатичность; St^2 –относительная стабильность сорта; A – критерий стабильности; ИЭП – индекс экологической пластичности; b_i – коэффициент линейной регрессии; σ^2_d – стабильность; КМ – коэффициент мультипликативности /

Notes: Y_{min} – minimum yield; Y_{max} – maximum yield; (Y_{min} - Y_{max}) – stress resistance; (Y_{max} + Y_{min})/2 – genetic flexibility; ПУСС – indicator of the stability level of the variety; Sc – breeding value; H_{om} – homeostaticity; St^2 – relative stability of the variety; A – stability criterion; ИЭП –environmental plasticity index; b_i – linear regression coefficient; σ^2_d – stability; КМ – multiplicative coefficient

Показатель генетическая гибкость ((Y_{max} + Y_{min})/2) отражает среднюю урожайность в контрастных условиях среды и определяет степень соответствия генотипа сорта достаточному разнообразию погодных и агротехнических условий. Линии 2-17 и 21-17 формировали самый высокий максимальный уровень продуктивности (Y_{max}) 6,24 и 6,05 т/га, у них выявлено наиболее оптимальное соотношение между генотипом и внешними факторами среды, показатель генетической гибкости составил 5,58 и 5,41 т/га соответственно.

Мерой гомеостаза генотипа служит его способность получения не только максимальной, но и устойчивой величины урожая в различных условиях возделывания. Для ее определения проведен расчет показателей селекционной ценности (Sc), уровня стабильности сорта (ПУСС) и гомеостатичности (H_{om}). По степени гомеостатичности выделилась линия 1-17 (Sc – 4,63, ПУСС – 212 %, H_{om} – 18,3), данные показатели превышают среднесортовые значения на 10,2 %, 81,0 абс. % и 98,9 % соответственно.

Высокими показателями уровня стабильности сорта (ПУСС), селекционной ценностью (Sc) и слабой изменчивостью продуктивности (CV) обладают линии 465-17 (152 %; 4,28; 7,9) и 531-17 (140 %; 4,29; 8,5).

Высокие значения относительной стабильности (St^2) и критерия стабильности (A) свидетельствуют о лучшем сочетании у селекционных линий признаков урожайности и стабильности. По критерию стабильности все линии находятся примерно на одном уровне (более 2,0) и значения показателей относительной

стабильности приближаются к единице, что характеризует линии как стабильные.

Все селекционные линии по индексу экологической пластичности (ИЭП) практически не имели различий, показатель составил 0,96–1,03.

Показатель экологической пластичности (b_i) определяет уровень модификационной изменчивости урожая к внешним условиям среды. У изучаемых линий прослеживалась сильная дифференциация по коэффициенту линейной регрессии (b_i) – 0,51–1,29. Линии 21-17; 2-17; 290-17 и 428-17 с b_i>1, согласно методике S. A. Eberhart и W. A. Russell, проявили высокую отзывчивость на улучшение условий среды и требовательны к высокому уровню агротехники. Их необходимо возделывать по высокоинтенсивным технологиям, которые будут способствовать более полному раскрытию потенциальных возможностей. Линии 465-17 и 1-17 (b_i – 0,51 и 0,64 соответственно) слабо реагировали на внешние факторы, чем весь набор изучаемых генотипов, для этих линий будут эффективны экстенсивные технологии возделывания, где они при минимальных затратах могут дать максимально стабильную отдачу. Урожайность линий 259-17 и 531-17 (b_i = 1,0) изменялась в полном соответствии с изменением условий выращивания. Критерий Стьюдента (при t_{05} = 2,31) позволил разграничить материал по значениям b_i на 3 группы: в первую вошли линии 21-17; 2-17 и 290-17 (значимо >1); во вторую – 1-17 и 465-17 (значимо <1); в третью – оставшиеся (не отличаются от 1).

Показатель стабильности (σ^2_d) сильно варьирует в пределах изучаемого материала, у линий 1-17; 465-17 и сорта Агата выявлена более высокая стабильность – 0,27–0,46, низкая у линий 2-17; 21-17 и 259-17 – 0,81–0,87.

Для определения пластичности линий использован коэффициент мультипликативности (КМ). По данному показателю линиям 465-17, 1-17 и сорту Агата свойственна слабая отзывчивость на условия среды (1,50–1,97), линиям 531-17, 259-17 и 428-17 – средняя (2,00–2,09), линиям 290-17, 2-17 и 21-17 – высокая отзывчивость (2,22–2,27).

Для полного анализа полученной информации провели ранжирование значений параметров адаптивности и экологической пластичности для каждого селекционного номера (наиболее высокий ранг – первый, преимуществом обладают образцы с низкой суммой рангов).

Комплексный рейтинг по совокупности всех признаков: продуктивности, адаптивности, пластичности и гомеостатичности выявил, что в данных исследованиях линии 1-17; 465-17 и 21-17 являются лучшими (рис.).

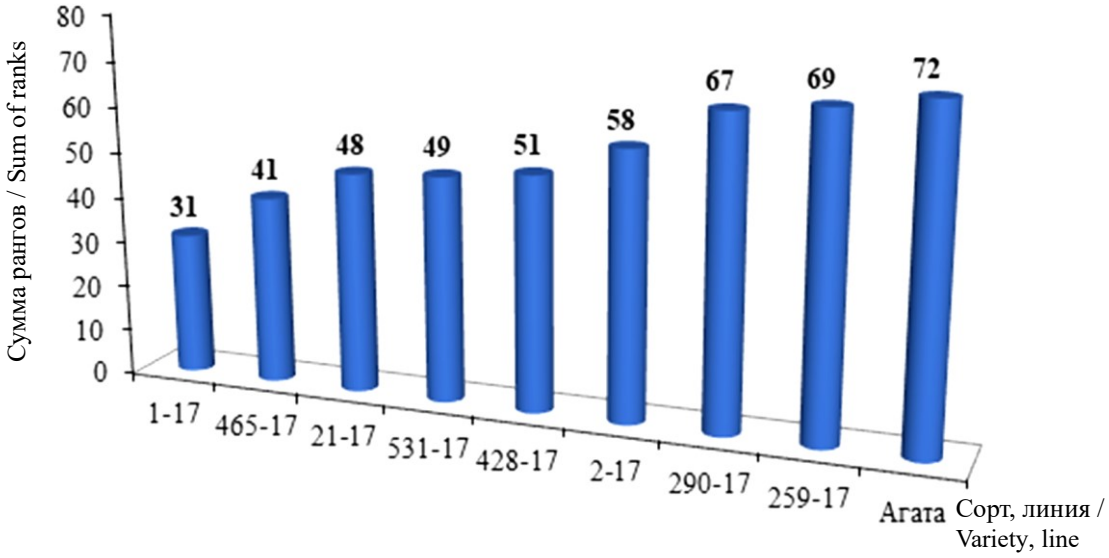

Рис. **Распределение линий яровой мягкой пшеницы по сумме рангов параметров адаптивности и пластичности /**

Fig. **Distribution of spring soft wheat lines by the sum of the ranks of adaptability and plasticity parameters**

Заключение. На основании проведенных исследований (2020–2023 гг.) определен уровень адаптивных свойств у линий яровой мягкой пшеницы при возделывании в условиях Рязанской области. Выделена линия 21-17 с урожайностью 5,30 т/га, обладающая высокой генетической гибкостью ($(Y_{max} + Y_{min})/2$) – 5,41, гомеостатичностью (H_{om}) – 13,7 и отзывчивостью на улучшения условий выращивания (b_i – 1,29, КМ – 2,27). Высокий рейтинг

по сумме рангов параметров адаптивности и пластичности отмечен у линий 1-17 и 465-17: стрессоустойчивость (Y_{min} - Y_{max}) – -0,63 и -1,0; селекционная ценность (Sc) – 4,63 и 4,28; уровень стабильности сорта (ПУСС) – 212 и 152 %; вариабельность (CV) – 5,8 и 7,9 % и стабильность урожайности (σ^2_d) – 0,27 и 0,41 соответственно. Самый низкий рейтинг по сумме рангов параметров адаптивности и пластичности получил стандартный сорт Агата.

Статистический анализ данных по экологической пластичности (b_i) линий позволил распределить их на группы по уровню отзывчивости на улучшение условий возделывания: 21-17, 2-17, 290-17, 428-17 – интенсивные; 465-17, 1-17 – экстенсивные.

Список литературы

1. Сапега В. А., Турсумбекова Г. Ш. Урожайность, экологическая пластичность и стабильность сортов яровой мягкой и твердой пшеницы в южной лесостепи Тюменской области. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2020;21(2):114–123. DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2020.21.2.114-123 EDN: YLOPFG

2. Sun C., Zhang F., Yan X., Zhang X., Dong Z., Cui D., Chen F. Genome-wide association studyfor 13 agronomic traits reveals distribution of superior alleles in bread wheat from the Yellow and Huai Valley of China. Plant Biotechnology Journal. 2017;15(8):953–969. DOI: https://doi.org/10.1111/pbi.12690

3. Барковская Т. А., Гладышева О. В., Кокорева В. Г. Сравнительный анализ нового сорта яровой мягкой пшеницы Арсея с районированными сортами. Зерновое хозяйство России. 2022;(1):30–34. DOI: https://doi.org/10.31367/2079-8725-2022-79-1-30-34 EDN: LZXXMZ

4. Рыбась И. А. Повышение адаптивности в селекции зерновых культур. Сельскохозяйственная биология. 2016;51(5):617–626. DOI: https://doi.org/10.15389/agrobiology.2016.5.617rus EDN: WZJQEN

5. Сапега В. А. Сортовое районирование яровой пшеницы и оценка ее сортов по урожайности и адаптивности в Тюменской области. Зерновое хозяйство России. 2023;15(4):51–58. DOI: https://doi.org/10.31367/2079-8725-2023-87-4-51-58 EDN: QLVBXK

6. Новохатин В. В., Шеломенцева Т. В., Драгавцев В. А. Новый комплексный подход к изучению динамики повышения адаптивности и гомеостатичности у сортов мягкой яровой пшеницы (на примере длительной истории селекции в Северном Зауралье). Сельскохозяйственная биология. 2022;57(1):81–97. DOI: https://doi.org/10.15389/agrobiology.2022.1.81rus EDN: DAYGED

7. Новикова А. А., Гречишкина О. С., Емельянова А. А., Пустовалова А. А., Замерзляк М. В. Параметры адаптивности и гомеостатичности сортов ярового ячменя в условиях Оренбургской области. Земледелие. 2022;(8):35–38. DOI: https://doi.org/10.24412/0044-3913-2022-8-35-38 EDN: FOHUYC

8. Филиппов Е. Г., Брагин Р. Н., Донцов Д. П. Анализ показателей адаптивности сортов и линий ярового ячменя в экологическом сортоиспытании. Таврический вестник аграрной науки. 2022;(4(32)):221–230. Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=49982577 EDN: WFQBII

9. Crossa J., Perez P., Hickey J., Burgueno J., Ornella L., Ceron-Rojas J., Zhang X., Dreisigacker S., Babu R., Li Y., Bonnett D., Mathews K. Genomic prediction in CIMMYT maize and wheat breeding program. Heredity. 2014;112(1):48–60. DOI: https://doi.org/10.1038/hdy.2013.16

10. Набатова Н. А., Уткина Е. И., Парфенова Е. С., Шамова М. Г., Псарева Е. А., Жукова М. Н. Сравнительная оценка сортов озимой ржи по экологической устойчивости в условиях Кировской области. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2022;23(5):655–665. DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2022.23.5.655-665 EDN: XZLABR

11. Волкова Л. В., Щенникова И. Н. Сравнительная оценка методов расчета адаптивных реакций зерновых культур. Теоретическая и прикладная экология. 2020;(3):140–146. DOI: https://doi.org/10.25750/1995-4301-2020-3-140-146 EDN: ORZBYL

12. Барковская Т. А., Гладышева О. В., Кокорева В. Г. Оценка адаптивности и потенциальной продуктивности яровой мягкой пшеницы в условиях Рязанской области. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2023;24(1):58–65. DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.1.58-65 EDN: FTMXHZ

13. Асеева Т. А., Зенкина К. В. Экологическая устойчивость тритикале к неблагоприятным факторам окружающей среды. Юг России: экология, развитие. 2020;15(1):49–59. DOI: https://doi.org/10.18470/1992-1098-2020-1-49-59 EDN: IQPYHJ

14. Сафонова И. В., Аниськов Н. И. Эффективность использования некоторых критериев определения адаптивности на примере сортов озимой ржи. Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2023;184(2):66–75. DOI: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2023-2-66-75 EDN: XIWQOG

15. Гребенникова И. Г., Чешкова А. Ф., Стёпочкин П. И., Алейников А. Ф., Чанышев Д. И. Методика оценки экологической пластичности сортов злаковых культур. Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2020;50(2):100–108. DOI: https://doi.org/10.26898/0370-8799-2020-2-12 EDN: BXIXZT

References

1. Sapega V. A., Tursumbekova G. Sh. Yield, ecological plasticity and stability of spring soft and durum wheat varieties in the southern forest steppe of Tyumen region. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2020;21(2):114–123. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2020.21.2.114-123

2. Sun C., Zhang F., Yan X., Zhang X., Dong Z., Cui D., Chen F. Genome-wide association studyfor 13 agronomic traits reveals distribution of superior alleles in bread wheat from the Yellow and Huai Valley of China. Plant Biotechnology Journal. 2017;15(8):953–969. DOI: https://doi.org/10.1111/pbi.12690

3. Barkovskaya T. A., Gladysheva O. V., Kokoreva V. G. The comparative analysis of the new spring bread wheat variety 'Arseya' with the zoned varieties. *Zernovoe khozyaystvo Rossii* = Grain Economy of Russia. 2022;(1):30–34. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.31367/2079-8725-2022-79-1-30-34

4. Rybas' I. A. Breeding grain crops to increase adaptability. *Sel'skokhozyaystvennaya biologiya* = Agricultural Biology. 2016;51(5):617–626. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.15389/agrobiology.2016.5.617rus

5. Sapega V. A. Varietal zoning of spring wheat and estimation of its varieties according to productivity and adaptability in the Tyumen region. *Zernovoe khozyaystvo Rossii* = Grain Economy of Russia. 2023;15(4):51–58. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.31367/2079-8725-2023-87-4-51-58

6. Novokhatin V. V., Shelomentseva T. V., Dragavtsev V. A. A novel integrative approach to study the dynamics of an increase in common spring wheat adaptivity and homeostaticity (on the example of breeding programs in the Northern Trans-Ural). *Sel'skokhozyaystvennaya biologiya* = Agricultural Biology. 2022;57(1):81–97. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.15389/agrobiology.2022.1.81.rus

7. Novikova A. A., Grechishkina O. S., Emel'yanova A. A., Pustovalova A. A., Zamerzlyak M. V. Parameters of adaptability and homeostasis of spring barley varieties under the conditions of the Orenburg region. *Zemledelie*. 2022;(8):35–38. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.24412/0044-3913-2022-8-35-38

8. Filippov E. G., Bragin R. N., Dontsov D. P. Analysis of adaptability indicators of spring barley varieties and lines in the ecological variety testing. *Tavricheskiy vestnik agrarnoy nauki* = Taurida herald of the agrarian sciences. 2022;(4(32)):221–230. (In Russ.). URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=49982577

9. Crossa J., Perez P., Hickey J., Burgueno J., Ornella L., Ceron-Rojas J., Zhang X., Dreisigacker S., Babu R., Li Y., Bonnett D., Mathews K. Genomic prediction in CIMMYT maize and wheat breeding program. Heredity. 2014;112(1):48–60. DOI: https://doi.org/10.1038/hdy.2013.16

10. Nabatova N. A., Utkina E. I., Parfenova E. S., Shamova M. G., Psareva E. A., Zhukova M. N. Comparative analysis of winter rye varieties by ecological stability in the conditions of Kirov region. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2022;23(5):655–665. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2022.23.5.655-665

11. Volkova L. V., Shchennikova I. N. Comparative evaluation of methods for calculating adaptive responses of cereals. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya* = Theoretical and Applied Ecology. 2020;(3):140–146. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.25750/1995-4301-2020-3-140-146

12. Barkovskaya T. A., Gladysheva O. V., Kokoreva V. G. Assessment of adaptability and potential productivity of spring soft wheat in the conditions of the Ryazan region. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2023;24(1):58–65. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.1.58-65

13. Aseeva T. A., Zenkina K. V. Environmental sustainability of triticales to adverse environmental factors. *Yug Rossii: ekologiya, razvitie* = South of Russia: ecology, development. 2020;15(1):49–59. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.18470/1992-1098-2020-1-49-59

14. Safonova I. V., Anis'kov N. I. The effectiveness of using some criteria for determining adaptability on the example of winter rye cultivars. *Trudy po prikladnoy botanike, genetike i selektsii* = Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding. 2023;184(2):66-75. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2023-2-66-75

15. Grebennikova I. G., Cheshkova A. F., Stepochkin P. I., Aleynikov A. F., Chanyshev D. I. Method of assessment ecological plasticity of cereal crop varieties. *Sibirskiy vestnik sel'skokhozyaystvennoy nauki* = Siberian Herald of Agricultural Science. 2020;50(2):100–108. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.26898/0370-8799-2020-2-12

Сведения об авторах

✉ **Барковская Татьяна Анатольевна**, старший научный сотрудник отдела селекции и семеноводства, Институт семеноводства и агротехнологий – филиал ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», ул. Парковая, д. 1, с. Подвязье, Рязанский район, Рязанская область, Российская Федерация, 390502, e-mail: podvyaze@bk.ru, **ORCID: https://orcig.org/0000-0002-4453-0367**, e-mail: barkovskaya-1960@mail.ru

Гладышева Ольга Викторовна, директор филиала, Институт семеноводства и агротехнологий – филиал ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», ул. Парковая, д. 1, с. Подвязье, Рязанский район, Рязанская область, Российская Федерация, 390502, e-mail: podvyaze@bk.ru, **ORCID: https://orcig.org/0000-0001-9030-0055**

Information about the authors

✉ **Tatyana A. Barkovskaya**, senior researcher, the Department of Breeding and Seed Production, Institute of Seed Production and Agrotechnologies – branch of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM, st. Parkovaya, d. 1, s. Podvyazye, Ryazan district, Ryazan Region, Russian Federation, 390502, e-mail: podvyaze@bk.ru, **ORCID: https://orcig.org/0000-0002-4453-0367**, e-mail: barkovskaya-1960@mail.ru

Olga V. Gladysheva, director of a separate subdivision, Institute of Seed Production and Agrotechnologies – branch of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM, st. Parkovaya, d. 1, s. Podvyazye, Ryazan district, Ryazan region, Russian Federation, 390502, e-mail: podvyaze@bk.ru, **ORCID: https://orcig.org/0000-0001-9030-0055**

✉ – Для контактов / Corresponding author

ЗАЩИТА РАСТЕНИЙ/PLANT PROTECTION

https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.1.43-52
УДК 632.51:633.367.2(470.2)

Засоренность посевов люпина узколистного в зернотравянопропашном севообороте на Северо-Западе России

© 2024. А. М. Шпанев✉
ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Представлены результаты многолетнего (2012–2018 гг.) изучения засоренности посевов люпина узколистного, используемого в качестве сидерального пара в зернотравянопропашном севообороте на Северо-Западе РФ (Ленинградская область). Оценку засоренности посевов люпина узколистного сорта Олигарх проводили ежегодно на 24 постоянных учетных площадках (0,1 м²). По результатам учетов определено формирование разнообразного и постоянного по годам видового состава сорной растительности (от 15 до 25 видов), преимущественно средней и сильной степени засоренности (141–593 экз./м²), при доле малолетников – от 90,4 до 99,7 %. Массовыми видами сорных растений являлись марь белая, фиалка полевая, торица полевая, пикульники, дымянка аптечная, пастушья сумка обыкновенная, из многолетников преобладали осот полевой, мать-и-мачеха обыкновенная, щавель малый, пырей ползучий, чистец болотный. Определено превалирующее воздействие на засоренность посевов люпина узколистного погодных условий и индивидуальных особенностей засоренности полей севооборота. Совокупное воздействие обоих этих факторов выражалось величинами, равными 47,7; 57,8 и 47,1 % соответственно в отношении видового обилия, начальной численности и конечной фитомассы сорных растений. Длительное внесение минеральных удобрений приводило к повышению численности малолетников (в 1,5-1,6 раза) и снижению густоты произрастания многолетних видов сорных растений (в 1,6–1,9 раза). Влияние интегрированной системы защиты растений, применяемой в севообороте, проявлялось в достоверном снижении густоты многолетних видов сорных растений (в 4,6 раза) в посевах люпина узколистного.

Ключевые слова: *Lupinus angustifolius* L., *сорные растения, видовой состав, структура засоренности, минеральные удобрения, система защиты растений.*

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

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

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов

Для цитирования: Шпанев А. М. Засоренность посевов люпина узколистного в зернотравянопропашном севообороте на Северо-Западе России. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2024;25(1):43–52.
DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.1.43-52

Поступила: 22.08.2023 Принята к публикации: 15.01.2024 Опубликована онлайн: 28.02.2024

Weed infestation of narrow-leaved lupine crops in grain-grass-rowed crop rotation in the North-West of Russia

© 2024. Alexander M. Shpanev✉
Agrophysical Research Institute, Saint-Petersburg, Russian Federation
All-Russian Institute of Plant Protection, Saint-Petersburg, Russian Federation

The results of the long term (2012–2018) study of weed infestation of green fallow fields with narrow-leaved lupin in the crop rotation including cereals, grasses and row crops in the North-West region of Russia (Leningrad region) are presented. The assessment of weediness in the narrow-leaved lupine variety Oligarch crops was carried out annually at 24 permanent survey sites (0.1 square meter). Based on the results of the surveys, the formation of a diverse and constant species composition of weeds (from 15 to 25 species), mainly of medium and severe degree of weediness (141–593 specimens per square meter), with the proportion of young plants ranging from 90.4 to 99.7 %. The mass species of weeds were lamb's quarters, field pansy, corn spurry, hemp-nettles, fumitory, shepherd's purse, prevalent perennial weeds were field sowthistle, coltsfoot, red sorrel, couch grass, marsh woundwort. The prevailing influence of weather conditions and individual characteristics on the weed infestation of narrow-leaved lupine crop has been determined. The combined effect of two factors was expressed by 47.7, 57.8 and 47.1 %

in terms of species abundance, initial abundance and final phytomass of weeds, respectively. Long term application of mineral fertilizers led to an increase in the number of annuals (by 1.5–1.6 times) and a decrease in the density of growth of perennial weed species (by 1.6–1.9 times). The influence of the integrated plant protection system used in the crop rotation was manifested in a significant decrease in the density of perennial weed species (by 4.6 times) in narrow-leaved lupine crop.

Keywords: *Lupinus angustifolius* L., *weeds, species composition, weediness structure, mineral fertilizers, plant protection system*

***Acknowledgments*:** The work was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education within the state assignment of the Federal State Budgetary Scientific Institution "Agrophysical Research Institute" (theme No. FGEG-2022-0007).

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

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

For citations: Shpanev A. M. Weed infestation of narrow-leaved lupine crops in grain-grass-rowed crop rotation in the North-West of Russia. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2024;25(1):43–52. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.1.43-52

Received: 22.08.2023 Accepted for publication: 15.01.2024 Published online: 28.02.2024

Современной системой земледелия Северо-Западного региона России предусмотрено широкое использование однолетних трав, чаще всего вики посевной с овсом посевным, в качестве предшественника озимых зерновых культур [1]. Однако в последние годы участились случаи использования не однолетних трав, а сидерального пара, что обусловлено резким снижением объемов внесения органических и минеральных удобрений. Одной из основных сидеральных культур в нашей стране является люпин узколистный, который отличается повышенной способностью к фиксации атмосферного азота и других элементов питания из почвы за счет мощной корневой системы [2]. Последействие сидерального пара проявляется в снижении плотности сложения почвы [3], значительном увеличении содержания подвижных форм фосфора и калия [4], фотосинтетического потенциала и урожайности возделываемых культур [5, 6, 7]. При этом основное назначение сидерального пара состоит в поддержании и воспроизводстве почвенного плодородия, повышении активности почвенных микроорганизмов и увеличении количества сапротрофных видов, в том числе грибов антагонистов [8, 9, 10]. Использование сидерации улучшает фитосанитарное состояние агроценозов, что выражается снижением пораженности культурных растений корневыми гнилями, потенциальной засоренности семенами сорных растений и органами вегетативного размножения, а также фактической засоренности посевов [11, 12]. Уделяя внимание фитосанитарному последействию сидеральных паров в севообороте, исследователи зачастую упускали из виду ту ситуацию, которая складывалась на поле парозанимающей культуры, что, безусловно, важно для понимания ожидаемых в будущем эффектов. При этом важно уточнить, что при возделывании люпина узколистного в условиях Северо-Западного региона России, несмотря на наличие люпиновой тли и комплекса грибных патогенов, хозяйственное значение имеют преимущественно сорные растения, которым и следует уделять основное внимание при оценке фитосанитарного состояния посевов [13, 14]. Схожую ситуацию можно отметить и для других регионов возделывания данной культуры, когда применением гербицидов достигалось значительное повышение урожая зеленой массы и семян люпина узколистного [15, 16].

Цель исследований – провести оценку засоренности посевов люпина узколистного и влияния на нее длительного применения минеральных удобрений и интегрированной системы защиты растений в зернотравянопропашном севообороте на Северо-Западе России.

Новизна исследований. Выявлен видовой состав сорной растительности, произрастающей в посевах люпина узколистного зернотравянопропашного севооборота на Северо-Западе РФ. Приведены фактические данные по структуре, степени и типу засоренности посевов люпина, а также доминантным видам сорных растений, являющихся целевыми объектами защитных мероприятий при возделывании данной культуры. Определено значение погодных условий, длительного применения минеральных удобрений и интегрированной системы защиты растений в формировании засоренности посевов люпина узколистного в зернотравянопропашном севообороте на Северо-Западе РФ.

Материал и методы. Исследования проводили на посевах люпина узколистного в период очередной ротации зернотравяно-пропашного севооборота (2012–2018 гг.). Севооборот расположен на биополигоне Меньковского филиала Агрофизического НИИ (Ленинградская область) и представляет собой длительный фундаментальный опыт (с 1982 г.) по изучению эффектов от применения минеральных удобрений и системы защиты растений. Чередование культур в севообороте: люпин узколистный; рожь озимая; ячмень яровой + многолетние травы; многолетние травы 1 года пользования; многолетние травы 2 года пользования; картофель; рапс яровой. Предшественником люпина в севообороте служил рапс яровой, последующей культурой – рожь озимая. Возделывался сорт люпина – Олигарх (оригинатор Ленинградский НИИСХ «Белогорка»).

Почва опытных полей дерново-слабоподзолистая супесчаная, мощность пахотного слоя – 23 см, pH_{KCl} – 4,6, содержание гумуса (по Тюрину) – 1,9 %, подвижных соединений фосфора и калия (по Кирсанову) – 257 и 92 мг/кг соответственно.

Схемой опыта предусмотрено изучение трех уровней удобренности, формируемых разными дозами минеральных удобрений ($N_0P_0K_0$, $N_{65}P_{50}K_{50}$, $N_{100}P_{75}K_{75}$) из расчета планируемой урожайности культур. Внесение минеральных удобрений осуществлялось механически поперек поля ежегодно в одинаковых дозах под все культуры, за исключением многолетних трав 1 г. п. и люпина, в отношении которого известно о снижении активности азотфиксации под действием азотных удобрений.

Система защиты растений распространялась на такие культуры, как рожь озимая, ячмень яровой, рапс яровой и картофель. Она состояла из обработок семенного материала фунгицидами, в период вегетации – гербицидами, фунгицидами и инсектицидами при превышении экономических порогов вредоносности. Средства защиты растений вносили механическим способом на одной половине поля, другая являлась контролем. На многолетних травах и люпине узколистном, который использовали в качестве сидерального пара, средства защиты растений не применяли, изучали последействие их применения на других культурах севооборота.

Площадь под каждым из вариантов удобренности составляла 0,18 га, системы защиты растений – 0,3 га, поля – 0,6 га, севооборота – 4,2 га.

Оценку засоренности посевов люпина узколистного проводили с помощью методики постоянных учетных площадок 0,1 м^2 [17], размещенных в количестве 24 штук на поле таким образом, чтобы охватывать все варианты опыта. В фазу трех настоящих листьев культуры определяли численность сорных растений в отдельности по видам и видовое обилие, характеризующее количество произрастающих видов сорняков на единице площади посева. В фазу формирования бобов, накануне дискования и запашки растений люпина в качестве сидерата, проводили итоговый учет засоренности посевов, включающий определение численности и фитомассы сорняков, а также надземной массы растений люпина на постоянных площадках, общее количество которых за весь период исследований составило 168 штук.

Погодные условия в годы проведения исследований различались по температурному режиму и суммарному количеству выпавших осадков. Избыточное увлажнение наблюдали в 2012, 2013 и 2016 гг., сильный дефицит влаги – в 2015 г., в другие годы количество осадков было близким к среднемноголетнему значению. С повышенным температурным режимом выделились годы 2013, 2014, 2016 и 2018, с пониженным – 2017. Таким образом, теплыми и влажными являлись 2013 и 2016 гг., которые были наиболее благоприятными как для роста и развития люпина узколистного, так и сорных растений.

В качестве дополнительных показателей засоренности вычисляли встречаемость и относительное обилие вида (доля в общей численности)[1]. С целью сравнения засоренности посевов люпина в разные годы проводили расчет индекса попарного видового сходства Сьёренсена[2] и коэффициента общности удельного обилия Шорыгина[3].

[1]Палий В. Ф. Об определении обилия в фаунистических исследованиях. Сборник энтомологических работ АН Киргизской ССР. Фрунзе, 1965. Т. 4. С. 112–121.

[2]Sorensen T. A method of establishing groups of equal amplitude in plant sociology based on similarity of species content and its application to analysis of the vegetation on Danish commons. Biologiske skrifter. 1948;(5):1–34.

[3]Шорыгин А. А. Питание, избирательная способность и пищевые взаимоотношения некоторых Goobiidae Каспийского моря. Зоологический журнал. 1939;18(1):27–51.

Статистическая обработка данных полевых учетов засоренности посевов люпина узколистного включала проведение дисперсионного и корреляционного анализов в программе Statistica 6.

Результаты и их обсуждение. Согласно проведенным исследованиям, состав сорной растительности, произрастающей в посеве люпина узколистного, насчитывал 31 вид из 12 разных семейств. Наиболее представительными были семейства астровые, яснотковые, гвоздичные и гречишные. Большая часть видов принадлежала к группе малолетников и только 7 из них имели многолетний цикл развития. К числу последних относятся бодяк щетинистый (*Cirsium setosum* (Willd.) Bess.), мать-и-мачеха обыкновенная (*Tussilago farfara* L.), осот полевой (*Sonchus arvensis* L.), щавель малый (*Rumex acetosella* L.), пырей ползучий (*Elitrigia repens* (L.) Nevski), мята полевая (*Mentha arvensis* L.), чистец болотный (*Stachys palustris* L.). Видовое разнообразие сорных растений изменялось по годам от 15–17 до 23–25 видов (табл. 1). Стабильным присутствием в посеве данной культуры отличались 12 видов, среди которых марь белая (*Chenopodium album* L.), пастушья сумка обыкновенная (*Capsella bursa-pastoris* (L.) Medic.), фиалка полевая (*Viola arvensis* Murr.), редька дикая (*Raphanus raphanistrum* L.), торица полевая (*Spergula arvensis* L.), дымянка лекарственная (*Fumaria officinalis* L.). Кроме сорных растений, в посеве люпина регулярно встречалась падалица рапса ярового (*Brassica napus* L.) и растения клевера лугового (*Trifolium pretense* L.), которые входят в состав возделываемых в севообороте культур.

Ежегодно в посеве люпина узколистного зернотравянопропашного севооборота формировался однотипный видовой состав сорных растений, на что указывают высокие значения индекса попарного видового сходства (табл. 2). Усредненное по годам значение данного индекса составило 0,78. В то же время следует отметить довольно низкую общность удельного обилия, а значит, и изменчивость в количественном соотношении между видами сорных растений в разные годы.

Количество видов сорных растений, произрастающих на единице площади посева люпина, варьировало по годам от 4 до 9 видов/м^2, численный состав – от 96 до 593 экз/м^2, или в 6,2 раза. Чаще фиксировалась сильная степень засоренности (2013, 2014, 2017 и 2018 гг.), тогда как слабая только в 2015 г. Начальная густота сорных растений в значительной степени определялась условиями увлажнения и теплообеспеченности в первые 17–20 суток после высева культуры. Коэффициенты корреляции между густотой произрастания малолетних видов сорных растений, суммой осадков и среднесуточной температурой воздуха за период от посева до образования третьего настоящего листа у растений люпина узколистного имели значения, равные 0,35 и 0,74 ($p \leq 0,05$) соответственно. С другой стороны, повышенный температурный режим на фоне дефицита влаги на протяжении периода вегетации культуры отрицательно сказывался на формировании надземной массы сорных растений ($r = -0,59$, $p \leq 0,05$). Величина накопленной фитомассы у сорных растений варьировала по годам от 104,4 до 524,1 г/м^2, что от общей массы фитоценоза составляло 6,1−24,2 % (табл. 3).

Анализ данных выявил преобладание малолетнего типа засоренности, который отмечали в посевах люпина узколистного на протяжении 6 лет изучения. В эти годы на долю малолетников приходилось от 90,4 до 99,7 % от общего количества произрастающих сорных растений (табл. 4). Нетипичность ситуации, наблюдаемой в 2014 г., явилась следствием особенностей засоренности данного поля севооборота, на котором ежегодно отмечали высокую численность видов сорных растений с многолетним циклом развития. В посеве люпина узколистного насчитывалось 13 экз/м^2 многолетних злаковых сорняков и 94 экз/м^2 – многолетних двудольных, что составило соответственно 3,4 и 24,6 % от общей численности сорных растений. Первые были представлены пыреем ползучим, вторые – в основном осотом полевым (64 экз/м^2) и мать-и-мачехой обыкновенной (27 экз/м^2). Таким образом, в 2014 г. наблюдали формирование корневищно-корнеотпрысково-малолетнего типа засоренности и в этом же году была сформирована наибольшая надземная масса сорной растительности, на долю которой пришлось 24,2 % от совокупной массы культурных и сорных растений.

Таблица 1 – **Видовой состав сорной растительности в посевах люпина узколистного зернотравянопропашного севооборота на Северо-Западе РФ /**
Table 1 – **Species composition of weeds in narrow-leaved lupine crops of grain-grass-rowed crop rotation in the North-West of the Russian Federation**

Вид / Specie	*2012 г.*	*2013 г.*	*2014 г.*	*2015 г.*	*2016 г.*	*2017 г.*	*2018 г.*
Астровые; Asteraceae Dumort.							
Бодяк щетинистый; *Cirsium setosum* (Willd.) Bess.	+	-	+	-	-	-	-
Бородавник обыкновенный; *Lapsana communis* L.	+	+	+	+	+	+	+
Мать-и-мачеха обыкновенная; *Tussilago farfara* L.	-	-	+	-	-	-	+
Осот полевой; *Sonchus arvensis* L.	-	+	+	-	+	+	+
Ромашка непахучая; *Matricaria inodora* L.	+	+	+	+	+	+	+
Сушеница топяная; *Filaginella uliginosa* (L.) Opiz	-	+	-	-	+	-	-
Бобовые; Fabaceae Lindl.							
Горошек волосистый; *Vicia hirsute* (L.) S. F.Gray	-	+	+	+	-	+	+
Горошек четырехсемянный; *Vicia tetrasperma* (L.) Schreb	-	+	+	+	-	+	+
Бурачниковые; Boraginaceae Juss.							
Незабудка полевая; *Myosotis arvensis* (L.) Hill.	+	+	+	+	+	+	+
Гвоздичные; Caryophyllasceae Juss.							
Звездчатка средняя; *Stellaria media* (L.) Vill.	+	+	+	-	+	+	+
Торица полевая; *Spergula arvensis* L.	+	+	+	+	+	+	+
Торичник красный; *Spergularia rubra* (L.) J. et C. Presl	-	+	-	-	-	-	-
Ясколка дернистая; *Cerastium holosteioidees* Fries	-	-	-	-	-	-	+
Гречишные; Polygonaceae Juss.							
Горец птичий; *Polygonum aviculare* L.	-	-	-	-	-	-	+
Горец развесистый; *Persicaria lapathifolia*	-	-	+	+	+	+	+
Гречишка вьюнковая; *Fallopia convolvulus* (L.) A. Love	-	-	+		+	+	+
Щавель малый; *Rumex acetosella* L.	-	+	-	+	+	-	+
Дымянковые; Fumariaceae Eaton							
Дымянка лекарственная; *Fumaria officinalis* L.	+	+	+	+	+	+	+
Капустные; Brassicaceae Burnet							
Пастушья сумка обыкновенная; *Capsella bursa-pastoris* (L.) Medic.	+	+	+	+	+	+	+
Редька дикая; *Raphanus raphanistrum* L.	+	+	+	+	+	+	+
Ярутка полевая; *Thlapsi arvense* L.	+	-	-	-	-	+	-
Маревые; Chenopodiaceae Vent.							
Марь белая; *Chenopodium album* L.	+	+	+	+	+	+	+
Мятликовые; Poaceae Barnhart							
Мятлик однолетний; *Poa annua* L.	-	+	-	-	+	-	-
Пырей ползучий; *Elitrigia repens* (L.) Nevski	-	+	+	+	+	-	-
Норичниковые; Scrophulariaceae Juss.							
Вероника полевая; *Veronica arvensis* L.	-	-	-	-	-	-	+
Фиалковые; Violaceae Batsch							
Фиалка полевая; *Viola arvensis* Murr.	+	+	+	+	+	+	+
Яснотковые; Lamiaceae Lindl.							
Мята полевая; *Mentha arvensis* L.	-	-	+	-	-	-	+
Пикульник двунадрезанный; *Galeopsis bifida* Boenn.	+	+	+	+	+	+	+
Пикульник красивый; *Galeopsis spesiosa* Mill.	+	+	+	+	+	+	+
Пикульник обыкновенный; *Galeopsis tetrahit* L.	+	+	+	+	+	+	+
Чистец болотный; *Stachys palustris* L.	-	+	+	-	-	+	+
Всего видов / Total species	15	23	23	17	19	20	25

Таблица 2 – **Сходство видового состава и общность удельного обилия сорных растений в посевах люпина узколистного в разные годы /**
Table 2 – **The similarity of the species composition and the commonality of the specific abundance of weeds in the crops of narrow-leaved lupine in different years**

Год Year	*Индекс попарного видового сходства / Pairwise similarity index*						*Коэффициент общности удельного обилия / Generality coefficient of specific abundance*					
	2013 г.	*2014 г.*	*2015 г.*	*2016 г.*	*2017 г.*	*2018 г.*	*2013 г.*	*2014 г.*	*2015 г.*	*2016*	*2017*	*2018*
2012	0,67	0,74	0,75	0,74	0,80	0,65	26,4	59,6	41,0	59,7	53,0	66,1
2013	-	0,77	0,78	0,82	0,77	0,73	-	22,3	29,0	54,4	30,7	27,6
2014	-	-	0,80	0,79	0,88	0,83	-	-	29,2	51,9	46,5	52,9
2015	-	-	-	0,81	0,81	0,76	-	-	-	43,8	34,7	45,2
2016	-	-	-	-	0,80	0,76	-	-	-	-	68,4	41,0
2017	-	-	-	-	-	0,84	-	-	-	-	-	78,6

Таблица 3 – **Засоренность посевов люпина узколистного в зернотравянопропашном севообороте на Северо-Западе РФ /**
Table 3 – **Infestation of narrow-leaved lupine crops in grain-grass-rowed crop rotation in the North-West of the Russian Federation**

Показатели засоренности / Weed infestation indicators	*2012 г.*	*2013 г.*	*2014 г.*	*2015 г.*	*2016 г.*	*2017 г.*	*2018 г.*
Видовое обилие, видов/м^2 / Species abundance, species/m^2	4	9	8	5	5	7	8
Густота, экз/м^2 / Abundance, pieces/m^2	186	545	383	96	141	325	593
Фитомасса при уборке урожая, г/м^2 / Phytomass at harvest, g/m^2	182,4	104,4	524,1	159,3	155,9	505,7	241,4
Доля в общей фитомассе агрофитоценоза, % / Share in the total phytomass of agrophytocenosis, %	6,1	6,3	24,2	11,8	6,8	23,5	15,2

Таблица 4 – **Структура засоренности посевов люпина узколистного в зернотравянопропашном севообороте на Северо-Западе РФ /**
Table 4 – **The structure of weed infestation of narrow-leaved lupine crops in grain-grass-rowed crop rotation in the North-West of the Russian Federation**

Биологическая группа / Biological group of weed	*Доля в общей численности сорных растений, % / Share in the total number of weeds, %*						
	2012 г.	*2013 г.*	*2014 г.*	*2015 г.*	*2016 г.*	*2017 г.*	*2018 г.*
Многолетние злаковые / Perennial grass weeds	0,0	0,2	3,4	0,4	2,1	0,0	0,0
Многолетние двудольные / Perennial dicotyledonous weeds	0,3	2,7	24,6	9,2	2,3	0,9	2,4
Малолетние злаковые / Annual grass weeds	0,0	0,3	0,0	0,0	0,6	0,0	0,0
Малолетние двудольные / Annual dicotyledonous weeds	99,7	96,8	72,0	90,4	95,0	99,1	97,6

Среди видов сорных растений, произрастающих в посевах люпина узколистного зернотравянопропашного севооборота, самым массовым являлась марь белая, численность которой варьировала по годам от 38 до 225 экз/м^2, при среднемноголетнем значении − 91 экз/м^2. К числу доминантных видов сорняков также можно отнести фиалку полевую, пикульники (обыкновенный и двунадрезанный), торицу полевую, дымянку аптечную, пастушью сумку обыкновенную, для которых также отмечалась высокая частота встречаемости в посевах люпина узколистного (табл. 5).

Таблица 5 – **Доминантные виды сорных растений в посевах люпина узколистного зернотравянопропашного севооборота (Ленинградская обл., 2012–2018 гг.) /**
Table 5 – **Dominant weed species in narrow-leaved lupine crops of grain-grass-rowed crop rotation (Leningrad region, 2012–2018)**

Вид / Specie	*Густота, экз/м² / Abundance, pieces/m²*	*Доля в общей численности, % / Share in the total number, %*	*Встречаемость, % / The occurrence of weeds, %*
Марь белая / *Chenopodium album* L.	91	28,1	86,9
Фиалка полевая / *Viola arvensis* Murr.	43	13,2	78,6
Пикульники / *Galeopsis spp.*	34	10,4	70,8
Торица полевая / *Spergula arvensis* L.	21	6,7	67,3
Дымянка аптечная / *Fumaria officinalis* L.	19	6,0	38,1
Пастушья сумка обыкновенная / *Capsella bursa-pastoris* (L.) Medic.	12	3,8	49,4

Выявленная нами сильная изменчивость в количественных параметрах засоренности посевов люпина узколистного была обусловлена как влиянием погодных условий, так и индивидуальными особенностями засоренности полей севооборота. Совокупное воздействие обоих этих факторов выражалось величинами, равными 47,7, 57,8, 47,1 соответственно в отношении видового обилия, начальной численности и конечной фитомассы сорных растений. Влияние минеральных удобрений было также достоверным, но не таким выраженным, поскольку являлось следствием воздействия на сорную растительность в посевах других культур севооборота, где они вносились на протяжении длительного периода времени (табл. 6). Последствия гербицидных обработок, предусмотренных системой защиты картофеля, ячменя ярового, рапса ярового, ржи озимой, по итогам ротации севооборота за период 2012–2018 гг. не обозначились на засоренности посевов люпина узколистного, за исключением такого показателя, как видовое обилие. Это можно объяснить большим запасом семян сорных растений в почве. В то же время взаимодействие влияний погодных условий, минеральных удобрений и защитных мероприятий достоверно отражалось на количестве произрастающих видов сорных растений, их численности и фитомассе в посевах люпина.

Таблица 6 – **Вклад факторов в формирование засоренности посевов люпина узколистного в зернотравянопропашном севообороте на Северо-Западе РФ, % /**
Table 6 – **The contribution of factors to the formation of weed infestation of narrow-leaved lupine crops in the grain-grass-rowed crop rotation in the North-West of the Russian Federation, %**

Фактор / Factors	*Видовое обилие / Species abundance*	*Начальная засоренность / Initial weediness*	*Фитомасса сорных растений при уборке культуры / Phytomass of weeds during crop harvesting*
Погодные условия и особенности засоренности полей (Год + Поле) / Weather conditions and features of weediness of fields (Year + Field)	**47,7**	**57,8**	**47,1**
Минеральные удобрения (МУ) / Mineral fertilizers (MF)	**1,8**	**4,1**	**3,7**
Интегрированная система защиты растений (ИСЗР) / Integrated Plant Protection System (IPPS)	**1,8**	0,5	0,7
Взаимодействие (Год + Поле)-(МУ) / Interaction (Year + Field)-(MF)	**5,0**	**11,8**	**6,5**
Взаимодействие (Год + Поле)-(ИСЗР) / Interaction (Year + Field)-(IPPS)	**5,4**	**4,5**	**6,1**
Взаимодействие (МУ)-(ИСЗР) / Interaction (MF)-(IPPS)	0,6	0,1	1,8
Взаимодействие (Год + Поле)-(МУ)-(ИСЗР) / Interaction (Year + Field)-(MF)- (IPPS)	**5,1**	**5,1**	**7,3**
Повторений / Reps	0,6	0,8	3,9
Случайное / Random	32,0	15,3	22,9

Примечание: жирным шрифтом выделены достоверные значения при P≥0,95 /
Note: reliable correlation coefficients are in bold type P≥0.95.

Повышенное содержание основных элементов питания в почве, обусловленное длительным внесением полного минерального удобрения на полях севооборота, приводило к достоверному увеличению численности малолетних видов сорных растений (в 1,5–1,6 раза) и уменьшению густоты произрастания многолетников (в 1,6–1,9 раза) в посевах люпина узколистного. Например, численность мари белой в зависимости от дозы удобрений повышалась в 1,4–1,8 раза, пастушьей сумки – в 1,9–2,6 раза, пикульников – в 2,1–4,0 раза. Обратная реакция была выявлена для редьки дикой, плотность которой снижалась по мере улучшения питательного режима, соответственно в 1,4 и 5,0 раз. Этот вид относится к группе оксилофитов, предпочитающих кислую реакцию почвенного раствора [18]. Среди многолетников на неудобренном варианте опыта преимущественно произрастали мать-и-мачеха обыкновенная, щавель малый и чистец болотный (табл. 7). Влияние на засоренности посевов люпина узколистного интегрированной системы защиты растений, применяемой в севообороте, нашло отражение в достоверном снижении густоты многолетних видов сорных растений, главным образом осота полевого и мать-и-мачехи обыкновенной. Для малолетников с их большим запасом семян в почве схожих положительных изменений не отмечалось.

Таблица 7 – **Характеристика засоренности посевов люпина узколистного на разных уровнях минерального питания и системы защиты растений в зернотравянопропашном севообороте /**
Table 7 – **Characteristics of weed infestation of narrow-leaved lupine crops at different levels of mineral nutrition and plant protection system in grain-grass-rowed crop rotation**

Показатель засоренности / Weed infestation indicators	*Минеральные удобрения / Mineral fertilizers*			*Интегрированная система защиты растений / Integrated Plant Protection System*	
	$N_0P_0K_0$	$N_{65}P_{50}K_{50}$	$N_{100}P_{75}K_{75}$	*без ИСЗР / no IPPS*	*ИСЗР / IPPS*
Видовое обилие, видов/м^2 / Species abundance, species/m^2	6	7	7	7	6
Общая густота, экз/м^2 / Total abundance, pieces/m^2	252	378	353*	338	310
Многолетние, экз/м^2 / Perennial, pieces/m^2	31	19	16*	37	8**
Пырей ползучий, экз/м^2 / *Elitrigia repens* (L.) Nevski, pieces/m^2	1	1	4	4	1
Осот полевой, экз/м^2 / *Sonchus arvensis* L., pieces/m^2	13	13	7*	17	4*
Мать-и-мачеха обыкновенная, экз/м^2 / *Tussilago farfara* L., pieces/m^2	8	1	2*	8	0*
Щавель малый, экз/м^2 / *Rumex acetosella* L., pieces/m^2	5	2	1**	4	2
Малолетние, экз/м^2 / Annual, pieces/m^2	221	359	337**	302	302
Пастушья сумка обыкновенная, экз/м^2 / *Capsella bursa-pastoris* (L.) Medic., pieces/m^2	7	13	18**	10	15*
Звездчатка средняя, экз/м^2 / *Stellaria media* (L.) Vill., pieces/m^2	1	3	3**	2	2
Марь белая, экз/м^2 / *Chenopodium album* L., pieces/m^2	64	92	117*	97	85
Пикульники, экз/м^2 / *Galeopsis spp.,* pieces/m^2	15	60	32**	41	27
Редька дикая, экз/м^2 / *Raphanus raphanistrum* L., pieces/m^2	10	7	2*	5	8
Фитомасса при уборке урожая, г/м^2 / Phytomass at harvest, gram/m^2	223,5	287,1	320,4*	292,9	251,1

* Различия достоверны при $P \geq 0,95$, ** при $P \geq 0,99$ / * Differences are significant at $P \geq 0.95$, ** при $P \geq 0.99$

Выводы. 1. На Северо-Западе РФ в условиях зернотравянопропашного севооборота выявлен довольно разнообразный и однотипный видовой состав сорной растительности в посевах люпина узколистного, невысокая общность удельного обилия видов по годам, преимущественно средняя и сильная степени засоренности при малолетнем типе.

2. Определено превалирующее воздействие на засоренность посевов люпина узколистного погодных условий и индивидуальных особенностей засоренности полей севооборота. Длительное внесение минеральных удобрений приводило к повышению численности малолетников и снижению густоты произрастания многолетних видов сорных растений. Влияние интегрированной системы защиты растений, применяемой в севообороте, проявлялось в достоверном снижении густоты многолетних видов сорных растений в посевах люпина узколистного.

Список литературы

1. Баздырев Г. И., Решетникова Н. Г. Эффективность элементов интенсификации земледелия в звене севооборота: сидеральный пар – озимая тритикале. Плодородие. 2012;(3(66)):4–6.
Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17773490 EDN: OYYJLR

2. Такунов И. П. Люпин в земледелии России: монография. Брянск: изд-во «Придесенье», 1996. 104 с.

3. Комарова Н. А. Значение различных паров в изменении плотности светло-серой лесной почвы и урожайности культур севооборота. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2018;63(2):58–63.
DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2018.63.2.58-63 EDN: XMFYIP

4. Тамонов А. М. Узколистный люпин в Нечерноземье. Земледелие. 2013;(3):30–31.
Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=19131944 EDN: QCRGXZ

5. Кузьминых А. Н. Формирование урожая озимой ржи в зависимости от видов пара. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2014;(2(39)):34. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21254991 EDN: RXDEYN

6. Новоселов С. И., Кузьминых А. Н. Влияние паровых предшественников и минеральных удобрений на урожайность озимой ржи. Вестник Чувашской государственной сельскохозяйственной академии. 2021;(3(18)):33–38. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47312304 EDN: PANWEN

7. Тамонов А. М. Сидеральный пар под картофель. Владимирский земледелец. 2016;(2(76)):27–29. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26453533 EDN: WGWYLT

8. Кузьминых А. Н., Манишкин С. Г., Габдуллин В. Р. Микробиологическая активность почвы паровых полей. Вестник КрасГАУ. 2011;(6(57)):49–51. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=nuszfn EDN: NUSZFN

9. Турусов В. И., Гармашов В. М., Абанина О. А., Михина Т. И. Сидеральный пар как прием повышения плодородия почвы и продуктивности озимой пшеницы. Международный научно-исследовательский журнал. 2016;(3-3(45)):125–126. DOI: https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.45.170 EDN: VOWYML

10. Солодун В. И., Цвынтарная Л. А. Влияние разных сидератов и способов их заделки на основные показатели плодородия серой лесной почвы, засоренность посевов и урожайность пшеницы. Актуальные вопросы аграрной науки. 2014;(10):5–12. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=wzzfpr EDN: WZZFPR

11. Разина А. А., Дятлова О. Г. Сидеральный пар – агроприем для снижения распространения корневой гнили. Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2016;(6(263)):5–12.
Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27641793 EDN: XGXAGV

12. Яловик Л. И., Гордеева Е. И., Миронова Н. В. Фитосанитарное состояние посевов люпина узколистного в условиях Псковской области. Молочнохозяйственный вестник. 2015;(4(20)):59–63.
Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=vdezxn EDN: VDEZXN

13. Яловик Л. И., Бавровский С. В., Яловик Е. А., Федорова С. М. Проблема засорённости посевов полевых культур южной части Псковской области и пути её решения. Известия Великолукской государственной сельскохозяйственной академии. 2023;(1(42)):70–77. Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=53766800 EDN: PABOUU

14. Абдуллаев Р. А., Вишнякова М. А., Егорова Г. П., Радченко Е. Е. Фитосанитарный мониторинг коллекции люпина узколистного ВИР на северо-западе Российской Федерации. Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2021;182(3):167–173. DOI: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2021-3-167-173 EDN: ZJDXUQ

15. Бопп В. Л., Данилов М. Е. Люпин узколистный: влияние гербицидов и удобрений на продуктивность зеленой массы. Вестник КрасГАУ. 2020;(5(158)):73–79. DOI: https://doi.org/10.36718/1819-4036-2020-5-73-79 EDN: ZDINTF

16. Конончук В. В., Никиточкин Д. Н., Тимошенко С. М., Назарова Т. О., Штырхунов В. Д., Шуркин А. Ю., Колотилина З. М. Зерновая продуктивность и азотфиксирующая способность люпина узколистного в зависимости от норм высева, удобрений и применения гербицидов при разных погодных условиях в центре Нечерноземной зоны России. Зернобобовые и крупяные культуры. 2021;(2(38)):104–114.
DOI: https://doi.org/10.24412/2309-348X-2021-2-104-114 EDN: WBCOIS

17. Зубков А. Ф. Методические указания по сбору полевой биоценологической информации с целью оценки вредоносности комплекса вредных организмов. Л., 1978. 18 с.

18. Шпанев А. М., Смук В. В., Фесенко М. А. Фитосанитарный эффект применения минеральных удобрений в посадках картофеля в Северо-Западном регионе. Агрохимия. 2017;(12):38–45.
DOI: https://doi.org/10.7868/S0002188117120067 EDN: ZUCFUR

References

1. Bazdyrev G. I., Reshetnikova N. G. The efficiency of agriculture intensification elements in the link of crop rotation: green manure fallow – winter triticale. *Plodorodie.* 2012;(3(66)):4–6. (In Russ.). URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17773490

2. Takunov I. P. Lupin in agriculture in Russia: a monograph. Bryansk: *izd-vo «Pridesen'e»*, 1996. 104 p.

3. Komarova N. A. The importance of various fallows for changing the density of light-gray forest soil and yield productivity of plants in crop rotation. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2018;63(2):58–63. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2018.63.2.58-63

4. Tamonov A. M. Lupinus angustifolius in non-chernozem zone. *Zemledelie.* 2013;(3):30–31. (In Russ.). URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=19131944

5. Kuzminykh A. N. The formation of winter rye yield depending on fallow type. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2014;(2(39)):34. (In Russ.). URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21254991

6. Novoselov S. I., Kuzminykh A. N. Influence of steam precedors and mineral fertilizers on the winter rye yield. *Vestnik Chuvashskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii* = Vestnik Chuvash State Agricultural Academy. 2021;(3(18)):33–38. (In Russ.). URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47312304

7. Tamonov A. M. Siderate fallow for potato. *Vladimirskiy zemledelets* = Vladimir agricolist. 2016;(2(76)):27–29. (In Russ.). URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26453533

8. Kuzminykh A. N., Manishkin S. G., Gabdullin V. R. Microbiological activity of the fallow soil. *Vestnik KrasGAU* = The Bulletin of KrasGAU. 2011;(6(57)):49–51. (In Russ.). URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=nuszfn

9. Turusov V. I., Garmashov V. M., Abanina O. A., Mikhina T. I. Pairs of green manure as a method of improving soil fertility and productivity of winter wheat. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* = International Research Journal. 2016;(3-3(45)):125–126. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.45.170

10. Solodun V. I., Tsvyntarnaya L. A. The influence of various green manure crops and ways of introdction on grey forest soil productivity and yield capacity of wheat. *Aktual'nye voprosy agrarnoy nauki* = Actual issues of agrarian science. 2014;(10):5–12. (In Russ.). URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=wzzfpr

11. Razina A. A., Dyatlova O. G. Green-manured fallow is an agricultural technique for reducing root rot propagation. *Sibirskiy vestnik sel'sko-khozyaystvennoy nauki* = Siberian Herald of Agricultural Science. 2016;(6(263)):5–12. (In Russ.). URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27641793

12. Yalovik L. I., Gordeeva E. I., Mironova N. V. Phytosanitary state of blue lupine crops under conditions of Pskov region. *Molochnokhozyaystvennyy vestnik*. 2015;(4(20)):59–63. (In Russ.). URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=vdezxn

13. Yalovik L. I., Bavrovskiy S. V., Yalovik E. A., Fedorova S. M. The field crop weediness problem in the southern part of the Pskov region and ways to solve it. *Izvestiya Velikolukskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii*. 2023;(1(42)):70–77. (In Russ.). URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=53766800

14. Abdullaev R. A., Vishnyakova M. A., Egorova G. P., Radchenko E. E. Phytosanitary monitoring of the narrow-leaved lupine collection of VIR in the northwest of Russia. *Trudy po prikladnoy botanike, genetike i selektsii* = Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding. 2021;182(3):167–173. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2021-3-167-173

15. Bopp V. L., Danilov M. E. Narrow-leaved lupine: the influence of herbicides and fertilizers on green mass productivity. *Vestnik KrasGAU* = The Bulletin of KrasGAU. 2020;(5(158)):73–79. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.36718/1819-4036-2020-5-73-79

16. Kononchuk V. V., Nikitochkin D. N., Timoshenko S. M., Nazarova T. O., Shtyrkhunov V. D., Shurkin A. Yu., Kolotilina Z. M. Grain productivity and nitrogen-fixing capacity of lupine narrow-leaf depending on seeding rates, fertilizers and application of herbicides under different weather conditions in the center of the Non-black earth zone of Russia. *Zernobobovye i krupyanye kul'tury* = Legumes and Groat Crops. 2021;(2(38)):104–114. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.24412/2309-348X-2021-2-104-114

17. Zubkov A. F. Methodological guidelines for the collection of field biocenological information in order to assess the harmfulness of a complex of harmful organisms. Leningrad, 1978. 18 p.

18. Shpanev A. M., Smuk V. V., Fesenko M. A. Phytosanitary effect of mineral fertilizers on the potato plantations in the North-West region. *Agrokhimiya*. 2017;(12):38–45. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.7868/S0002188117120067

Сведения об авторе

✉ **Шпанев Александр Михайлович**, доктор биол. наук, главный научный сотрудник лаборатории опытного дела, ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт», Гражданский проспект, д. 14, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, 195220, e-mail: office@agrophys.ru; ведущий научный сотрудник лаборатории интегрированной защиты растений, ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений», шоссе Подбельского, д. 3, г. Санкт-Петерург, Пушкин, Российская Федерация, 196608, e-mail: info@vizr.spb.ru,
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4346-318X, e-mail: ashpanev@mail.ru

Information about the author

✉ **Alexander M. Shpanev**, DSc in Biology, chief researcher, the Laboratory of Experimental Work, Agrophysical Research Institute, Grazhdansky pr., 14, Saint-Petersburg, Russian Federation, 195220, e-mail: office@agrophys.ru; Leading Researcher at the Laboratory of Integrated Plant Protection, All-Russian Institute of Plant Protection, Podbelskogo, 3, Saint-Petersburg, Pushkin, Russian Federation, 196608, e-mail: info@vizr.spb.ru,
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4346-318X, e-mail: ashpanev@mail.ru

✉ – Для контактов / Corresponding author

https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.1.53-61
УДК 633.854.78:582.916.26

(cc) BY

Изменчивость заразихи, паразитирующей на подсолнечнике, при интенсивном его возделывании в регионах Российской Федерации

© 2024. Т. С. Антонова, Н. М. Арасланова✉, М. В. Ивебор, С. Л. Саукова
ФГБНУ «Федеральный научный центр «Всероссийский научно-исследовательский институт масличных культур имени В. С. Пустовойта», г. Краснодар, Российская Федерация

Ежегодный мониторинг засорённости полей семенами заразихи на протяжении последних 15 лет показывает, что, несмотря на широкое распространение повсеместно расы G, на многих из них сохраняется примесь семян других, более слабых рас: E и F. Цель исследований – идентифицировать расовую принадлежность семян заразихи с полей регионов РФ, где возделывается подсолнечник, и описать новые ботанические признаки у представителей наиболее распространённой расы G паразита. Для идентификации рас использовали международно принятые линии-дифференциаторы подсолнечника LC 1093, P 96, устойчивые к расам заразихи от A до F, а также авторскую линию RG, обладающую иммунитетом к расе G и всем предыдущим, гибрид НК Брио (устойчив к расам от A до E) и гибрид Тунка (устойчив к расам от A до G). На отдельных полях Краснодарского и Ставропольского краёв, Ростовской, Воронежской, Самарской, Оренбургской областей в 2020–2022 гг. выявлен пока в малом количестве высокоагрессивный биотип паразита (будущая раса H). Очевидно, что продолжение интенсивного возделывания подсолнечника на этих полях приведёт к быстрому распространению расы H в указанных регионах. Кроме расового разнообразия, отмечены часто встречающиеся изменения габитуса растений (кустистые формы) у ряда представителей расы G. Впервые нами показано разрастание гаусториально-клубеньковой области паразита и формирование множественных стеблей из одного клубенька. Это создаёт преимущество в конкурентных отношениях за питание между особями заразихи, располагающимися рядом на одном корне подсолнечника и, в конечном итоге, ускоряет и увеличивает семенную продуктивность растения. Быстрая эволюция Orobanche cumana* **Wallr.** ***в ходе интенсификации возделывания подсолнечника выражается не только в формировании новых физиологических рас, но и в ускоренном увеличении семенной продуктивности паразита путём изменения габитуса растений, включая гаусториально-клубеньковую область.

Ключевые слова: *Orobanche cumana* Wallr.*, расы заразихи, гаусториально-клубеньковая область, изменение габитуса, кустистость*

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: Антонова Т. С., Арасланова Н. М., Ивебор М. В., Саукова С. Л. Изменчивость заразихи, паразитирующей на подсолнечнике, при интенсивном его возделывании в регионах Российской Федерации. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2024;25(1):53–61. DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.1.53-61

Поступила: 11.12.2023 Принята к публикации: 22.01.2024 Опубликована онлайн: 28.02.2024

Variability of broomrape parasitizing on sunflower during its intensive cultivation in the regions of the Russian Federation

© 2024. Tatyana S. Antonova, Nina M. Araslanova✉, Maria V. Iwebor, Svetlana L. Saukova
V. S. Pustovoit All-Russian Research Institute of Oil Crops, Krasnodar, Russian Federation

Annual monitoring of broomrape seed infestation of fields over the last 15 years shows that despite the widespread distribution of race G, seeds of other, weaker races E and F remain in many fields. The aim of the research was to identify the racial belonging of broomrape seeds from fields in sunflower-growing regions of the Russian Federation and to describe new botanical characteristics in representatives of the most widespread race G of the parasite. To identify the races, there were used the internationally accepted sunflower differential lines LC 1093, P 96, resistant to races A to F, as well as the original line RG, which is immune to race G and all previous races, hybrid NK Brio (resistant to races A to E) and hybrid Tunka (resistant to races A to G). A highly aggressive parasite biotype (future race H) has so far been identified in small numbers in some fields in the Krasnodar, Stavropol, Rostov, Voronezh, Samara and Orenburg regions. Obviously, the continuation of intensive sunflower cultivation in these fields will lead to a rapid spread of race H in these regions. In addition to the racial diversity, frequent changes in plant habitus (bushy forms) were observed in some representatives of race G. For the first time, there has been demonstrated an overgrowth of the haustorial-tubercle area of the parasite and the formation of multiple stems from a single tubercle. This creates an advantage in the competition for food between adjacent broomrape individuals on the same

sunflower root and ultimately accelerates and increases the seed production of the plant. The rapid evolution of Orobanche cumana Wallr. during the intensification of sunflower cultivation is expressed not only in the formation of new physiological races, but also in an accelerated increase in the seed productivity of the parasite by changing the habitus of the plants, including the haustorial-tubercle area.

Keywords: *Orobanche cumana* Wallr., *races of broomrape, haustorial-tubercle area, habitus change, bushiness*

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. Pustovoit 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 no conflict of interest.

For citation: Antonova T. S., Araslanova N. M., Iwebor M. V., Saukova S. L. Variability of broomrape parasitizing on sunflower during its intensive cultivation in the regions of the Russian Federation. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2024;25(1):53–61. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.1.53-61

Received: 11.12.2023 Accepted for publication: 22.01.2023 Published online: 28.02.2024

Широко распространённый в большинстве стран, возделывающих подсолнечник, его облигатный паразит из высших растений – заразиха (*Orobanche cumana* Wallr.) – наносит ощутимый ущерб урожаям этой культуры [1, 2, 3], особенно вред в Европейских странах [4, 5, 6] и Средиземноморье [7]. Быстрая адаптация заразихи к возделываемому сортименту подсолнечника создаёт постоянные проблемы для селекцио-неров не только Европы, но и Китая [8, 9, 10]. Сопряжённая эволюция *O. cumana* и подсолнечника приводит к быстрому возникновению новых рас паразита, преодолевающих устойчивость выращиваемого сортимента подсолнечника [11, 12]. В Российской Федерации подсолнечник – основная масличная культура, высокорентабельная и этим привлекательная для возделывания. На протяжении трёх последних десятилетий площади, ежегодно занятые подсолнечником в РФ, неуклонно увеличиваются, достигнув в 2022 году 10 032 800 га. Тогда как изначально (более 30 лет назад) на всём бывшем советском пространстве эта культура занимала совокупную площадь 2 322 000 га [13]. Такой стремительный рост площадей, занятых подсолнечником, связан с сокращением научно обоснованного срока ротации этой культуры в севооборотах с 8–10 до 1–3 лет. В настоящее время повсеместное возделывание подсолнечника в севооборотах короткой ротации обостряет проблемы борьбы с заразихой.

Сокращение севооборота способствовало ускорению мутационного процесса заразихи, быстрому увеличению частоты появления её новых поколений и расширению ареалов их распространения. Этот процесс привёл не только к увеличению частоты возникновения новых биотипов заразихи, способных преодолеть устойчивость к ней у возделываемого сортимента подсолнечника, но и ускорил появление новых физиологических рас, формирование наследственно закреплённых признаков, способствующих развитию особи паразита, увеличению её семенной продуктивности и выживаемости под влиянием стремления человека уничтожить этот злостный сорняк. Подчеркнём этот факт: наблюдаются не только сопряжённая эволюция заразихи и подсолнечника, но и быстрые, наследственно закрепляющиеся изменения у отдельных особей паразита, улучшающие их устойчивость к неблагоприятным условиям среды обитания, возникающим под воздействием человека.

Цель исследований – идентифицировать расовую принадлежность семян заразихи с полей регионов РФ, где возделывается подсолнечник, и описать новые ботанические признаки у представителей паразитов наиболее распространённой расы G.

Научная новизна – у особи *O. Cumana* выявлено новообразование в корне подсолнечника – утолщение гаусториальной области, которое часто встречается у представителей расы G и сопровождается формированием кустистого габитуса растения-паразита в отличие от классической одностебельной формы.

Материал и методы. Идентификацию расовой принадлежности семян заразихи, собираемых ежегодно для селекции сортов и гибридов подсолнечника на устойчивость к эволюционирующим расам этого растения-паразита, проводили с использованием следующих генотипов подсолнечника: гибрид НК Брио (устойчив к 5 расам заразихи от A до E), линия LC 1093 (устойчива к расе F румынского типа, включая предыдущие расы), линия P 96 (устойчива к расе F испанского типа и всем предыдущим), гибрид Тунка (устойчив к расам от A до G) и линия RG (устойчива к расе G и всем предыдущим), созданная в лаборатории иммунитета Федерального научного центра «Всероссийский научно-исследовательский институт масличных

культур имени В. С. Пустовойта» (ВНИИМК). Восприимчивый ко всем расам заразихи сорт подсолнечника ВНИИМК 8883 использовали как контрольный вариант.

Семена каждого образца заразихи смешивали с почвенно-песчаной смесью (3:1) из расчёта не менее 200 мг на 1 кг этой смеси, которой наполняли пластиковые ящики размером 50х20х20 см. Высевали в них семена вышеуказанных генотипов подсолнечника и помещали в камеру искусственного климата Биотрон-5. Выращивали при температуре 25–27 °С, 16-часовом фотопериоде и соответствующей освещённости.

Проводили умеренный полив всходов при высыхании верхнего слоя почвы. Через 25 дней после появления всходов растения выкапывали и отмывали корни водой. Подсчитывали количество клубеньков и побегов заразихи на корнях 20 растений каждого дифференциатора, вычисляли среднюю степень поражения растений и сравнивали с контрольным вариантом в соответствии с методическими рекомендациями [14].

Семена чистой расы G заразихи собирали с гибридов подсолнечника иностранной селекции, содержащих ген *Or*7. Присутствие этого гена лишь в одной из родительских линий гибрида (обычно в отцовской форме) придаёт неполную устойчивость к расе G заразихи. При этом наблюдается некоторая степень поражения гибридных растений. Семена заразихи, собранные с таких поражённых растений, при их идентификации всегда представляли собой расу G [15].

С помощью стереоскопического микроскопа наблюдали ранние стадии формирования клубеньков и побегов заразихи на корнях растений восприимчивого к расе G сорта подсолнечника, выращенного на инфекционном фоне, созданном из семян этой расы.

Результаты и их обсуждение. Ежегодный мониторинг расовой принадлежности семян заразихи, собираемой в посевах подсолнечника разных регионов РФ: Самарской, Саратовской, Воронежской, Ростовской, Оренбургской, Волгоградской, Белгородской областей, Краснодарского и Ставропольского краёв, показывает повсеместно широкое распространение расы G в настоящее время. Однако вместе с этим до сих пор обнаруживаются поля, где в наличии имеется лишь раса E или F, или наблюдается смесь двух-трёх рас с преобладанием какой-либо одной из них. В таблице представлены выборочные данные по отдельным полям (в общей сложности 25) из шести регионов Российской Федерации за 2020–2022 гг. В целом, и по другим регионам, но не показанным в таблице, картина сходна с этими данными.

В представленной в таблице выборке полей за период 2020–2022 гг. на семи из них доминирует наименее вирулентная раса E. В целом, анализ расовой принадлежности образцов семян заразихи, собранных в период 2020–2022 гг. в разных регионах, показал их заметную неоднородность по вирулентности. Поэтому мониторинг расовой принадлежности семян заразихи с разных полей в регионах возделывания подсолнечника РФ продолжает оставаться актуальным и является необходимым условием для правильного размещения возделываемого сортимента подсолнечника, что способно замедлить образование высоковирулентных биотипов паразита на каждом конкретном поле.

Наличие в настоящее время в полях более слабых рас E и F можно объяснить несколькими причинами. Во-первых, давно известно, что всхожесть семян заразихи в полевых условиях может сохраняться до 20 лет [16]. Во-вторых, некоторые хозяйства поступают разумно, стремясь сохранить длительный севооборот, чем замедляют формирование и распространение более вирулентных биотипов паразита. В-третьих, в России, кроме гибридов, традиционно продолжается возделывание сортов подсолнечника, на которых более слабые расы заразихи могут воспроизводить новые поколения семян и тем самым продлевать своё существование в агроценозах.

Вместе с тем, в каждом из этих регионов уже имеются поля, где происходит накопление ещё более вирулентного биотипа H, преодолевшего устойчивость линии RG. В общей сложности половина представленных в таблице полей содержит этот биотип заразихи. Вопрос времени, когда на проблемных полях накопится достаточно много семян этого биотипа, чтобы их можно было собирать для создания жёсткого инфекционного фона при отборе устойчивых генотипов подсолнечника в селекции на иммунитет.

Как видно из данных таблицы, в настоящее время на полях РФ преобладает раса G. В продолжение наших более ранних исследований по искусственному заражению растений подсолнечника заразихой на инфекционном фоне, созданном из семян расы G, наблюдали ранние стадии формирования клубеньков паразита.

Таблица **– Степень поражения* дифференциаторов устойчивости подсолнечника заразихой, собранной на отдельных полях шести регионов РФ в 2020–2022 гг. /**
Table **– Degree of damage* to differentiators of sunflower resistance by broomrape collected in separate fields in six regions of the Russian Federation in 2020–2022**

Район сбора семян заразихи / District of broomrape seeds collection	*Контроль ВНИИМК 8883 / Control VNIIMK 8883*	*Дифференциаторы, устойчивые к расам / Differentiators, resistant to races*					*Преобладающая раса заразихи в образце семян / Predominant race of broomrape in a seed sample*	*Примесь других рас в образце семян / Admixture of other races in the seed sample*
		A-E (NK Bryo)	*A-F (LC1093)*	*A-F (P 96)*	*A-G (Tunca)*	*A-G (RG)*		
Ростовская область / Rostov region								
Азовский / Azovskij	30	12	20	5	6	0	G	E
Зерноградский / Zernogradskii	42	41	10	4	3	0,7	F	G, H
Октябрьский / Oktyabrskii	38	12	11	3	1,8	0	E	G
Матвеево-Курганский / Matveev-Kurganskii	55	48	59	31	15	6,0	G	H
Боковский / Bokovskii	53	59	36	23	2	0,9	F+G	H
Воронежская область / Voronezh region								
Калачевский / Kalatchevskii	41	20	22	9	9	0	G	E
Павловский / Pavlovskii	36	11	10	5	2	0,7	E	G, H
Новоусманский / Novousmanskii	31	30	21	16	4	2	F+ G	H
Каширский / Kashirskii	33	13	6	0	1	0,3	E	F, G, H
Самарская область / Samara region								
Большеглушицкий / Bolsheglushitskii	30	13	21	2	5	0,4	G	E, H
Волжский / Voljskii	42	18	28	4	6	0,5	G	F, H
Нефтегорский / Neftegorskii	34	9	9	5	4	0	E	G
Оренбургская область / Orenburg region								
Октябрьский / Oktyabrskii	30	31	15	0,3	4	0	F+ G	
Племановский / Plemanovskii	29	28	25	2	3	1	G	H
Бугурусланский / Buguruslanskii	32	0,6	0,4	0.5	2	0	E	G
Курманаевский / Kurmanaevskii	51	43	5,5	0,1	2	0	E	F, G
Ставропольский край / Stavropol region								
Кочубеевский / Kotchubeevskii	38	29	14	9	4	0	E	G
Советский / Sovetskii	56	39	23	7	11	1	E+ F+ G	H
Краснодарский край / Krasnodar region								
Приморско-Ахтарский / Primorsko-Ahtarskii	32	23	22	3	6	05	G	E
Крыловской / Krilovskoi	34	33	30	7	3	0,8	G	H
Выселковский / Viselkovskii	49	38	30	16	8	0	G	E, F
Брюховецкий / Bryukhovetskii	33	37	18	14	0	4	F+ G	H
Каневской / Kanevskoii	28	36	22	8	08	0	G	F
Тбилисский / Tbilisskii	38	23	24	4	3	0	G	E
Гиагинский / Giaginskii	36	31	39	2	1,5	4	G	H

* Степень поражения – количество особей заразихи на одно поражённое растение подсолнечника /
* The degree of infection is the number of broomrape individuals per infected sunflower plant.

Изучение с помощью стереоскопического микроскопа ранних стадий развития клубеньков и побегов заразихи расы G при поражении восприимчивых к ней генотипов подсолнечника показало, что описанная нами ранее [11] стадия утолщения корня растения-хозяина в гаусториальной области паразита постоянно наблюдается с довольно высокой частотой при оценке устойчивости селекционного материала подсолнечника на инфекционном фоне, созданном из семян расы G заразихи. Мы по-прежнему наблюдаем утолщения (равно как и отсутствие их) гаусториальной области паразита в корне растения подсолнечника под развивающимися клубеньками (рис. 1, а-и). Причём на одном и том же корне растения-хозяина могут располагаться рядом клубенёк с утолщением под ним, и клубенёк без утолщения (рис. 1, з, и). Это доказывает, что стимуляция формирования такого утолщения является свойством отдельных особей *O. cumana*. При этом на рисунке 1, з крупный клубенёк, расположенный слева, питается сразу от двух корней растения-хозяина и обе гаусториальные области утолщены (показаны стрелками). Справа под двумя другими клубеньками, расположенными на разных корнях, утолщения отсутствуют.

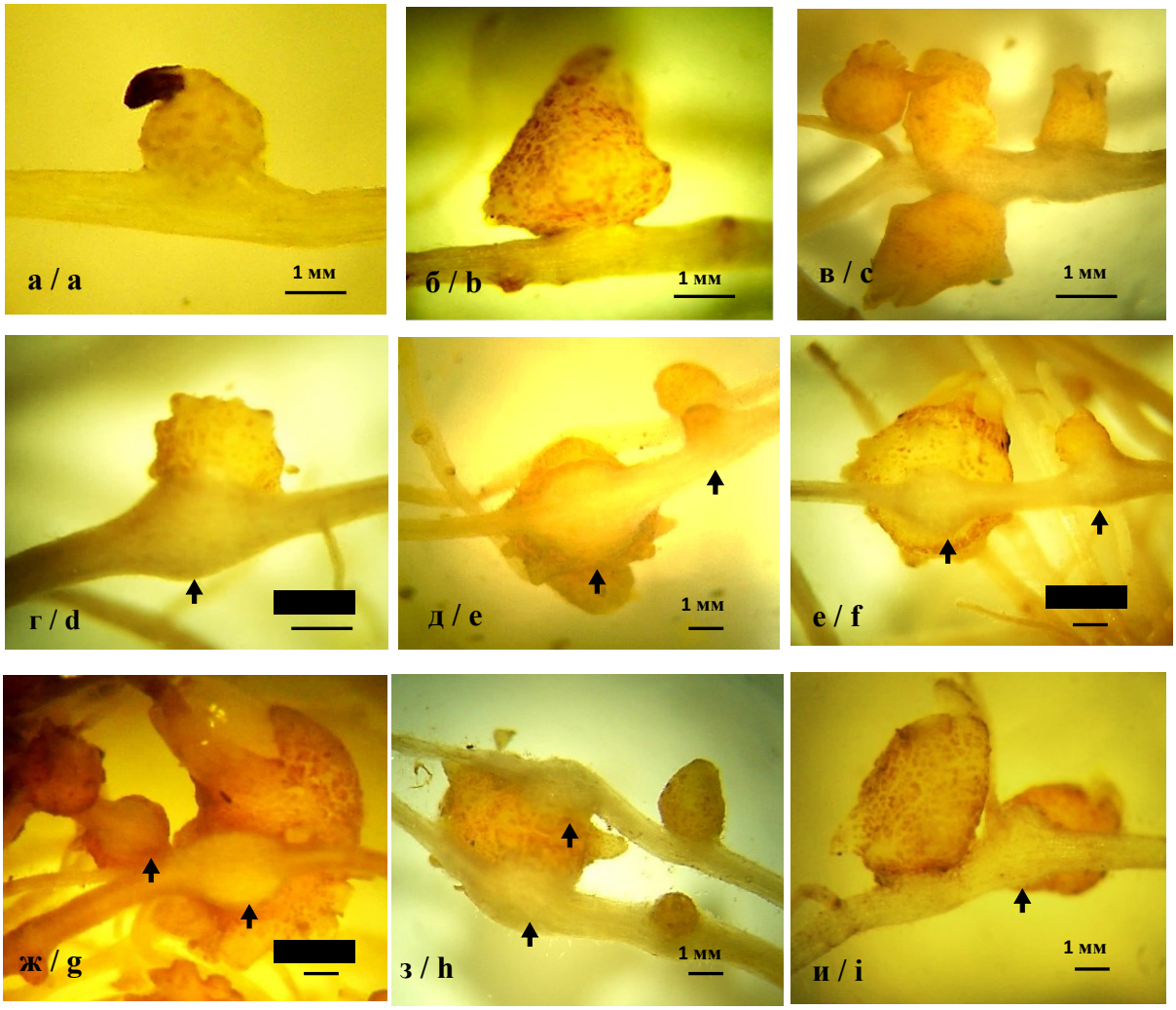

Рис. 1. **Область сочленения клубенька заразихи с корнем подсолнечника: а, б, в – отсутствие утолщения корня под клубеньками; г, д, е, ж – наличие утолщений (показаны стрелками); з, и – расположенные рядом на одном корне клубеньки без утолщений под ними и с утолщениями (показаны стрелкой); h – крупный клубенёк (слева) имеет гаусториальные области в двух корнях растения-хозяина и обе они утолщены (показаны стрелками). Справа под двумя другими клубеньками на разных корнях утолщения отсутствуют (ориг.) /**

Fig. 1. **The area of connection of the broomrape tubercle with the sunflower root: a, b, c – absence of root thickening under the tubercles; d, e, f, g – presence of thickenings (indicated by arrows); h, i – tubercles next to each other on the same root without thickenings under them and with thickenings (indicated by arrow); h – a large tubercle (left) has haustorial areas in two roots of the host plant and both are thickened (indicated by arrows). On the right, there are no thickenings under two other tubercles on different roots (orig.)**

Как правило, в клубеньке, под которым имеется утолщение корня растения-хозяина, закладываются многочисленные меристемы роста, из которых развиваются множественные побеги (рис. 2, а, б, в, г). При выходе их на поверхность почвы наблюдаем кустистые формы (рис. 3, а, б) отдельных особей заразихи, которые стали частым явлением в посевах подсолнечника на полях, засоренных семенами расы G. Габитус одного растения заразихи заметно изменился с 1-2-стебельного до многостебельного, хотя и те, и другие формы ещё долгое время будут сосуществовать в посевах подсолнечника.

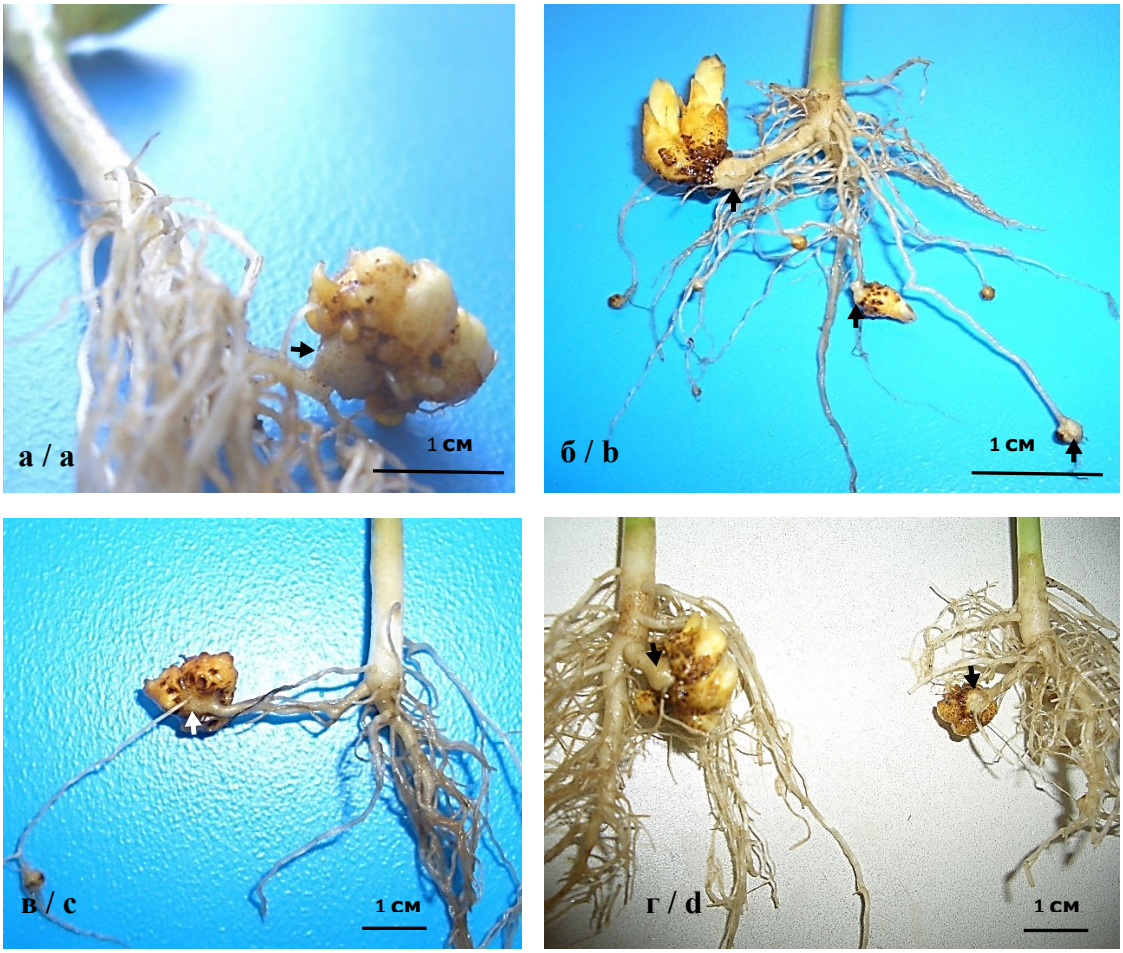

Рис. 2. **Множественные побеги, развивающиеся из клубенька *Orobanche cumana* Wallr. с утолщением под ним корня растения подсолнечника (а, в, г); б – утолщения корня под побегами заразихи и только начавшими развиваться клубеньками (ориг.) /**

Fig. 2. **Multiple shoots developing from *Orobanche cumana* Wallr. tuber with thickening of the sunflower root underneath (a, c, d); b – thickening of the root under broomrape shoots and tubercles that are just beginning to develop (orig.)**

Наблюдали также явление, когда клубенёк оказывается частично или полностью погружённым в разросшееся утолщение гаусториальной области в корне подсолнечника, при этом нижняя часть клубенька скрыта тканями корня (рис. 4, а, б). Из такого клубенька, как правило, развиваются множественные побеги.

Это дает основание предполагать, что в ходе постепенных преобразований клубеньки вида *Orobanche cumana* будут погружёнными в ткани корня подсолнечника. С точки зрения преимущества такого расположения клубенька перед наружным для особи заразихи, паразитирующей на подсолнечнике, это эволюционно более продвинутый признак – клубенёк оказывается защищённым от механических повреждений, когда выполняется междурядная прополка посевов. Собственно, клубенёк, как базовая ступень формирования будущего стебля паразита, выполняет функцию накопления в своих клетках питательных веществ, необходимых для закладки и развития апикальной меристемы (одной или нескольких) и начала роста побега. Для выполнения этой функции ему вовсе не обязательно находиться снаружи корня растения-хозяина.

Рис. 3. **Кустистость – новый габитус, встречающийся среди растений расы G *Orobanche cumana* на подсолнечнике: а – созревший куст; б – цветущие кусты (показаны стрелками) на одном растении-хозяине (ориг.) /**

Fig. 3. **Bushiness is a new habitus found in plants of race G of *Orobanche cumana* on sunflower: a – mature bush; b – flowering bushes of some individuals (indicated by arrows) on the same host plant (orig.)**

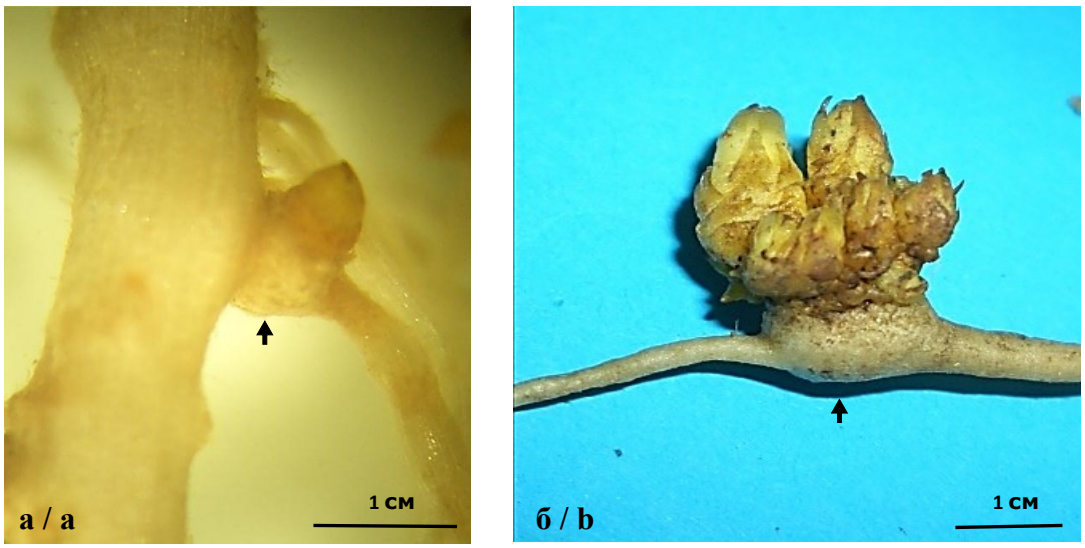

Рис. 4. **Утолщения (показаны стрелками) гаусториальной области в корне подсолнечника, скрывающие клубенёк заразихи: а – полное погружение клубенька, начавший развиваться побег заразихи выходит сразу из утолщения в пазухе придаточного корня; б – частичное погружение клубенька, нижняя часть которого скрыта тканями корня, а из верхней его части развиваются мощные множественные побеги (ориг.) /**

Fig. 4. **Thickenings (indicated by arrows) of the haustorial area in the sunflower root, hiding the broomrape tubercle: a – complete absorption of the tubercle, the broomrape shoot that has started to develop emerges directly from the thickening in the sinus of the additional root; b – partial absorption of the tubercle, its lower part is hidden by the root tissue, and strong multiple shoots develop from its upper part (orig.).**

Разрастание запасающей ткани паразита и заполнение её питательными веществами внутри корня подсолнечника способно обеспечить стартовое развитие у одной особи заразихи большего количества побегов, стеблей и, в конечном итоге, получение большего количества семян. Возможно, что укреплению всей структуры, которую мы назвали утолщением корня подсолнечника в гаусториальной области паразита, способствует ускоренное формирование вторичных тканей в развивающемся корне растения-хозяина. Возможно также, что

заразиха «научилась» стимулировать ускоренное образование вторичных тканей в корне растения-хозяина для защиты и укрепления собственных клеток и тканей в гаусториально-клубеньковой области. Необходимо сделать анатомические разрезы таких утолщений и дифференцировать в них ткани паразита и хозяина. Это должно быть предметом дальнейших исследований.

Заключение. Поля регионов РФ, возделывающих подсолнечник, в настоящее время засорены семенами преобладающей расы G *Orobanche cumana* Wallr. Однако до сих пор выявляются поля, где в наличии имеется лишь раса E или F, или наблюдается смесь двух-трёх рас с преобладанием какой-либо одной из них. Вместе с тем, в каждом из этих регионов уже имеются поля, где происходит накопление наиболее вирулентного биотипа H. Поэтому мониторинг расовой принадлежности семян заразихи с разных полей в регионах возделывания подсолнечника продолжает оставаться актуальным и является необходимым условием для правильного размещения возделываемого сортимента подсолнечника, что способно замедлить образование высоковирулентных биотипов паразита на каждом конкретном поле.

Гаусториальная область особи *O. cumana* в корне подсолнечника играет важнейшую роль в успешном развитии жизненного цикла паразита. У представителей расы G этого вида заразихи в настоящее время наблюдаются два типа гаусториальной области в корне подсолнечника: утолщенная и обычная (неутолщенная). Из клубенька заразихи, формирующегося над утолщенной гаусториальной областью, вырастают множественные побеги, которые образуют куст на поверхности почвы. Кустистая форма – новый, наследственно закреплённый габитус отдельных особей расы G у *O. cumana*, достаточно часто встречающийся на полях регионов РФ. Обнаружено явление частичного и полного погружения клубенька заразихи внутрь корня хозяина.

References

1. Kaya Y. Current situation of sunflower broomrape around the world. Proc. 3rd Int. Symp. on Broomrape (Orobanche spp.) in Sunflower. Cordoba, Spain, 2014. Pp. 9–18. URL: https://www.researchgate.net/profile/Yalcin-Kaya/publication/283085076_The_situation_of_broomrape_infestation_control_metods_in_sunflower_production_areas_in_Turkey/links/5629e4b708ae04c2aeb147b5/The-situation-of-broomrape-infestation-control-methods-in-sunflower-production-areas-in-Turkey.pdf

2. Ma D. T., Jan C. C. Distribution and race composition of sunflower broomrape (Orobanche cumana Wallr.) in Northern China. Proc. 3rd Int. Symp. on Broomrape (Orobanche spp.) in Sunflower. Cordoba, Spain, 2014. Pp. 65–69.

3. Molinero-Ruiz L., Delavault P., Perez-Vich B., Pacureanu-Joita M., Bulos M., Altieri E., Dominguez J. History of the race structure of Orobanche cumana and the breeding of sunflower for resistance to this parasitic weed: A review. Spanish journal of Agricultural Research. 2015;13(4):e10R01. DOI: https://doi.org/10.5424/sjar/2015134-8080

4. Martín-Sanz A., Malek J., Fernández-Martínez J. M., Pérez-Vich B., Velasco L. Increased virulence in sunflower broomrape (Orobanche cumana Wallr.) populations from Southern Spain is associated with greater genetic diversity. Frontiers in Plant Science. 2016;7:589. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00589

5. Risnoveanu L., Joita-Pacureanu M. J., Anton F. G. The virulence of broomrape (Orobanche cumana Wallr.) in sunflower crop in Braila area, in Romania. Helia. 2016;39(65):189–196. DOI: https://doi.org/10.1515/helia-2016-0015

6. Maklik E., Kyrychenko V. V., Pacureanu M. J. Race composition and phenology of sunflower broomrape (*Orobanche cumana* Wallr.) in Ukraine. Proceedings of the 4th International Symposium on Broomrape in Sunflower, Bucharest, Romania, 2018. Pp. 67–78.

7. Rubiales D. Can we breed for durable resistance to broomrapes? Phytopathologia Mediterranea. 2018;57(1):170–185. DOI: https://doi.org/10.14601/Phytopathol_Mediterr-22543

8. Dedic B., Radeka I., Jocic S., Miladinovic D., Cvejic S., Jockovic M., Radanovic A., Miklic V. Sunflower broomrape – update on virulence in Serbia. Proceedings of the 20th International Sunflower Conference, Novi Sad, Serbia, 2022. P. 164. URL: http://fiver.ifvcns.rs/handle/123456789/2891

9. Duca M., Clapco S., Gisca I., Cucereavii A., Martea R., Wang C. Aggressiveness of broomrape populations infesting sunflower in different countries. Proceedings of the 20th International Sunflower Conference, Novi Sad, Serbia, 2022. P. 257.

10. Zhang X., Zheng C., Wang M., An Y., Zhao S., Jan C. C. Identification of Broomrape (Orobanche cumana Wallr.) Biotypes in the Main Sunflower Growing Areas of China. Proceedings of the 4th International Symposium on Broomrape in Sunflower, Bucharest, Romania, 2018. P. 19–22.

11. Антонова Т. С., Арасланова Н. М., Ивебор М. В., Саукова С. Л. К морфофизиологической коэволюции заразихи (*Orobanche cumana*) и подсолнечника. Масличные культуры. 2022;(4(192)):12–19. DOI: https://doi.org/10.25230/2412-608X-2022-4-192-12-19 EDN: EOZPKV

Antonova T. S., Araslanova N. M., Ivebor M. V., Saukova S. L. To the morphophysiological co-evolution of the broomrape (*Orobanche cumana*) and sunflower. *Maslichnye kul'tury*. 2022;(4(192)):12–19. DOI: https://doi.org/10.25230/2412-608X-2022-4-192-12-19

12. Fernandez-Melero B., Martın-Sanz A., del Moral L., Perez-Vich B., Velasco L. A novel sunflower broomrape race with unusual virulence potentially caused by a mutation. Front. Plant Sci. 2023;14:1236511. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1236511

13. Antonova T. S. The history of interconnected evolution of Orobanche cumana Wallr. and sunflower in the Russian Federation and Kazakhstan. Helia. 2014;37(61):215–225. DOI: https://doi.org/10.1515/helia-2014-0017

14. Антонова Т. С., Питинова Ю. В., Арасланова Н. М., Демурин Я. Н. Методические особенности создания инфекционных фонов из семян заразихи в селекции подсолнечника на иммунитет. Масличные культуры. 2019;(2(178)):97–102. DOI: https://doi.org/10.25230/2412-608X-2019-2-178-97-102 EDN: AVKLFP

Antonova T. S., Pitinova Yu. V., Araslanova N. M., Demurin Ya. N. Methodological peculiarities of developing infection background from broomrape seeds in sunflower breeding for immunity. *Maslichnye kul'tury*. 2019;(2(178)):97–102. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.25230/2412-608X-2019-2-178-97-102

15. Антонова Т. С., Арасланова Н. М., Гучетль С. З., Челюстникова Т. А. Способ ускорения получения линии-донора устойчивости подсолнечника к заразихе расы G (*Orobanche cumana* Wallr.). Патент № 2720915 Российская Федерация. № заявки 2019124249; заявл. 26.07.2019; опубл. 14.05.2020. Бюл. №14. 8 с. Режим доступа: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet

Antonova T. S., Araslanova N. M., Guchetl' S. Z., Chelyustnikova T. A. A method to accelerate the production of a donor line for sunflower resistance to G-race infection (*Orobanche cumana* Wallr.). Patent RF no. 2720915, 2020. URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet

16. Molinero-Ruiz M. L., Perez-Vich B., Pineda-Martos R., Melero-Vara J. M. Indigenous highly virulent accessions of the sunflower root parasitic weed Orobanche cumana. Weed Research. 2008;48(2):169–178. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2007.00611.x

Сведения об авторах

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, г. Краснодар, Российская Федерация, 350038, e-mail: vniimk@vniimk.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8915-1136**

✉ **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

Ивебор Мария Вячеславовна, 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/0000-0003-3973-2965**

Саукова Светлана Леонидовна, кандидат биол. наук, старший 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/0000-0002-2176-3491**

Information about the authors

Tatyana S. Antonova, DSc in Biology, chief researcher, Head of the Laboratory of Immunity, V. S. Pustovoit All-Russian Research Institute of Oil Crops, 17 Filatov str., Krasnodar, Russian Federation, 350038, e-mail: vniimk@vniimk.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8915-1136**

✉ **Nina M. Araslanova,** PhD in Agriculture, leading researcher, the Laboratory of Immunity, V. S. Pustovoit All-Russian Research Institute of Oil Crops, 17 Filatov str., Krasnodar, Russian Federation, 350038, e-mail: vniimk@vniimk.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3607-9254**, e-mail: araslanova-nina@mail.ru

Maria V. Iwebor, PhD in Agriculture, leading researcher, the Laboratory of Immunity, V. S. Pustovoit All-Russian Research Institute of Oil Crops, 17 Filatov str., Krasnodar, Russian Federation, 350038, e-mail: vniimk@vniimk.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3973-2965**

Svetlana L. Saukova, PhD in Biology, senior researcher, the Laboratory of Immunity, V. S. Pustovoit All-Russian Research Institute of Oil Crops, 17 Filatov str., Krasnodar, Russian Federation, 350038, e-mail: vniimk@vniimk.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2176-3491**

✉ – Для контактов / Corresponding author

ЗЕМЛЕДЕЛИЕ, АГРОХИМИЯ, МЕЛИОРАЦИЯ / AGRICULTURE, AGROCHEMISTRY, LAND IMPROVEMENT

https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.1.62-74
УДК 631.582:631.82:631.62

Динамика гумуса в полевых севооборотах на осушаемых землях

© 2024. Ю. И. Митрофанов✉, Н. К. Первушина
ФГБНУ Федеральный исследовательский центр «Почвенный институт им. В. В. Докучаева», г. Москва, Российская Федерация

Цель исследования – изучить влияние разных видов полевых севооборотов, удобрений, осушения и гидротермических условий на динамику гумуса в мелиорируемой почве. Исследования проводили на опытных полях Всероссийского НИИ мелиорируемых земель (объекты мелиорации «Кузьминское болото 2», «Семеновское» и «Губино» в Тверской области). Осушение переувлажняемых почв проведено закрытым дренажом (междренное расстояние 18–20 м, глубина заложения дрен 0,9–1,2 м). Почвы опытных участков дерново-подзолистые легкосуглинистые глееватые, сформировавшиеся на морене или маломощном двучлене. Наблюдения за динамикой гумуса проводили в зернотравянопропашных (плодосменных), зернотравяных, зерновых и зернопропашных видах севооборотов. Влияние севооборота на содержание в почве гумуса определялось, прежде всего, составом, структурой выращиваемых культур и агротехникой их возделывания. За счет растительных остатков в плодосменном севообороте восстанавливалось 56,6–76,5 % объема минерализованного гумуса, в зерновом – 51,8 %, зернопропашном – 26,4 %. Наиболее существенные качественные изменения в составе гумуса наблюдали в плодосменном севообороте: при положительном балансе гумуса соотношение гуминовых и фульвокислот увеличилось с 0,63 до 0,74. Применение органических и минеральных удобрений существенно изменяет баланс гумуса в пахотном слое почвы. При органо-минеральной системе удобрения ежегодные потери гумуса (в кг/га) на осушаемом участке были меньше в 6,8–11,4 раза, на неосушаемом – в 2,1–2,6, чем в варианте без удобрений. Осушение переувлажняемых почв повышает роль удобрений в накоплении гумуса, уменьшает его потери и улучшает качественные параметры гумуса – соотношение гуминовых и фульвокислот в составе гумуса под влиянием осушения увеличилось с 0,61 до 0,88. Установлено влияние на динамику гумуса гидротермических условий. В годы с засушливой первой половиной вегетационного периода наблюдали повышение содержания гумуса, в избыточно влажные, наоборот, – понижение. Коэффициенты корреляции содержания гумуса с гидротермическими условиями мая-июня составили: -0,84 (1985–1993 гг.) и -0,95 (2014–2022 гг.).

Ключевые слова: *севооборот, плодородие, динамика гумуса, осушение, удобрения, растительные остатки*

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ Федеральный исследовательский центр «Почвенный институт им. В. В. Докучаева» (тема № 0439-2021-0001).

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Митрофанов Ю. И., Первушина Н. К. Динамика гумуса в полевых севооборотах на осушаемых землях. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2024;25(1):62–74. DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.1.62-74

Поступила: 21.12.2023 Принята к публикации: 12.02.2024 Опубликована онлайн: 28.02.2024

Dynamics of humus in field crop rotations on drained lands

© 2024. Yuriy I. Mitrofanov✉, Natalya K. Pervushina
Federal Research Centre V. V. Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, Russian Federation

The purpose of the research is to study the influence of different types of field crop rotation, fertilizers, drainage and hydrothermal conditions on the dynamics of humus in reclaimed soil. The studies were carried out on the experimental fields of the All-Russian Research Institute of Reclaimed Lands (reclamation sites "Kuzminskoye Boloto 2", "Semenovskoye" and "Gubino" in the Tver region). Waterlogged soils were drained using closed drainage (inter-drain distance is 18–20 m, drain depth is 0.9–1.2 m). The soils of the experimental plots are soddy-podzolic, light loamy, gleyic, formed on a moraine or thin binomial. Observations of the dynamics of humus were carried out in the grain-grass-row, grain-grass, grain and grain-row types of crop rotation. The influence of crop rotation on the content of humus in the soil was determined, first of all, by the composition, the structure of the crops grown and agricultural technology of their cultivation. Due to plant residues, 56.6–76.5 % of the volume of mineralized humus were restored in grain-grass-row crop rotation, 51.8 % in grain, 26.4 % in grain-row crop rotation. The most significant qualitative changes in the composition of humus were observed in grain-grass-row crop rotation: with a positive humus balance, the ratio of humic and fulvic acids increased from 0.63 to 0.74. The use of organic and mineral fertilizers significantly changes the balance of humus in the arable layer of the soil. With an organic-mineral fertilizer system, the annual loss of humus (in kg/ha) on the drained plot was 6.8–11.4 times less, on the non-drained plot – 2.1–2.6 times less than in the variant without fertilizers. Drainage of waterlogged soils increases the role of fertilizers in the accumulation of humus, reduces its losses and improves the quality parameters of humus – the ratio of humic and fulvic acids in the composition of humus under the influence of drainage increased from 0.61 to 0.88. The impact on the dynamics of humus of hydrothermal

conditions has been established. In years with a dry first half of the growing season, an increase in humus content is observed; in excessively wet years, on the contrary, a decrease is observed. The correlation coefficients of humus content with hydrothermal conditions in May-June were – 0.84 (in 1985–1993) and 0.95 (in 2014–2022).

Keywords: *crop rotation, fertility, humus dynamics, drainage, fertilizers, plant residues*

***Acknowledgements*:** the research was carried out under the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of Federal Research Center V. V. Dokuchaev Soil Science Institute (theme No. 0439-2021-0001).

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

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

For citations: Mitrofanov Yu. I., Pervushina N. K. Dynamics of humus in field crop rotations on drained lands. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2024;25(1):62–74. (In Russ.).
DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.1.62-74

Received: 21.12.2023 Accepted for publication: 12.02.2024 Published online: 28.02.2024

Уровень плодородия конкретной почвы определяется совокупностью базовых ее свойств, характеризующих способность почвы создавать необходимые условия для жизнедеятельности растений, их роста, развития и формирования урожаев. При оценке этой способности используют целый комплекс показателей физического, химического и биологического порядка, позволяющих определять основные параметры почвенного плодородия и уровень обеспеченности растений факторами жизни [1, 2]. Для дерново-подзолистых почв, в том числе и осушаемых, одним из ведущих показателей уровня их плодородия является содержание в почвах органического вещества и гумуса, от количества и качества которых зависят агрохимические, водно-физические, биологические свойства почвы и продуктивность полевых культур[1] [3, 4].

На прямую и тесную связь урожайности культур, особенно требовательных к почвенным условиям произрастания, с гумусированностью автоморфных почв указывают многие исследователи [5, 6].

На осушаемых землях все основные проблемы, связанные с гумусированностью почв, в полной мере сохраняют свое значение. Особенностью осушаемых почв является свойственная большинству объектов мелиорации пространственная неоднородность почвенного покрова, в том числе по гумусированности пахотного слоя почвы, обусловленная природными и антропогенными факторами. Характер природной пестроты определяется разнообразием агроэкологических видов земель, присутствием разноогленных почв, отличающихся количественными и качественными параметрами гумуса, особенно на начальном этапе использования осушаемых земель. Антропогенная неоднородность почвенного покрова создается при проведении мелиоративных работ [7, 8].

В процессе использования осушаемых земель динамика содержания гумуса в пахотном слое почвы формируется под влиянием целого комплекса факторов природного и антропогенного характера. Скорость и направленность процессов накопления и разложения органического вещества почвы зависит от генетических особенностей почв, вида севооборота, структуры и состава возделываемых культур в севообороте, количества и качества их растительных остатков, от применения удобрений и уровня урожайности, интенсивности физического воздействия на почву, почвенно-климатических условий и др. [9, 10].

Сохранение органического вещества почвы, а лучше его расширенное воспроизводство, является важнейшей системной проблемой земледелия в гумидной зоне, решение которой предполагает комплексный системный подход к реализации этой задачи. Особое место в сохранении и формировании положительного баланса гумуса занимает севооборот, являющийся интегрирующей структурой в системе управления почвенным плодородием [11, 12]. Севооборот, во многом, определяет соотношение отчуждаемой и накапливаемой в почве фитомассы, баланс органического вещества, элементов питания, направленность биологических и энергетических процессов и т. д. [13, 14]. Вместе с тем, многочисленными исследованиями, проведенными, в основном, на землях нормального увлажнения, установлено, что только отдельные зернотравяные и травопольные севообороты могут обеспечивать бездефицитный баланс гумуса за счет собственных ресурсов (растительных остатков культур). Во всех других видах севооборотов для сохранения или расширенного воспроизводства органического вещества необходимы дополнительные источники его поступления в почву.

[1]Воспроизводство гумуса и хозяйственно-биологический круговорот органического вещества в земледелии: рекомендации. М.: ВО «Агропромиздат», 1989. 63 с.

В качестве таких источников используются разные виды органических удобрений, солома, сидераты и др. В отношении их действия, норм внесения, обеспечивающих бездефицитный баланс гумуса в разных севооборотах, накоплен обширный экспериментальный материал [15, 16, 17].

На осушаемых землях длительных балансовых исследований по динамике органического вещества в полевых севооборотах проведено крайне мало. Вместе с тем, осушение оказывает существенное влияние на почвенные режимы, условия трансформации органического вещества в почве и на эффективность применения удобрений.

Цель исследования – изучить влияние полевых севооборотов, удобрений, осушения и гидротермических условий вегетации на динамику содержания гумуса в мелиорируемых дерново-подзолистых почвах Тверской области.

Новизна исследований – многолетние наблюдения за динамикой гумуса в осушаемой почве на различных объектах мелиорации позволили выявить временные закономерности его количественных и качественных изменений в условиях осушения под влиянием вида севооборота, дренажа, удобрений и гидротермических факторов.

Материал и методы. Исследования по динамике гумуса в пахотном слое мелиорируемых почв проводили на опытных полях Всероссийского НИИ мелиорируемых земель (ВНИИМЗ) в 6 опытах и 11 полевых севооборотах с длительностью наблюдений от 4 до 11 лет. Осушение переувлажненных почв закрытым дренажом (междренное расстояние 18–20 м, глубина заложения дрен 0,9–1,2 м) проведено на объектах мелиорации в 1972 г. («Кузьминское болото 2»), 1975 г. («Семеновское») и 1984 г. («Губино»). Почвы опытных участков дерново-подзолистые легкосуглинистые глееватые, сформировавшиеся на морене или маломощном двучлене. Исходное содержание подвижного фосфора в пахотном слое опытных участков, соответственно объектам мелиорации, составляло – 138...205, 121 и 216 мг/кг почвы, содержание обменного калия – 57…78, 38 и 123 мг/кг почвы; кислотность – 5,8…6,5, 6,1 и 6,0 ед. $pH_{сол.}$. Содержание гумуса в почве перед закладкой опытов, структурные параметры севооборотов, характеризующие их видовую принадлежность, нормы внесения органических удобрений приведены в таблице 1.

Наблюдения за динамикой гумуса проводили в разных видах севооборотов (плодосменных (зернотравянопропашных), зернотравяных, зерновых, зернопропашных и пропашных), различающихся составом и соотношением культур в структуре севооборота, паровыми полями и вариантами использования пласта многолетних трав.

В 1979–1994 гг. минеральные удобрения вносили из расчета 200–250 кг на 1 га севооборотной площади, в виде аммиачной селитры, хлористого калия и двойного суперфосфата. Опыты проводили в севооборотах, развернутых только во времени (в полях - закладках) или во времени и пространстве одновременно. Повторность 3-4-кратная, общая площадь делянок 100–500 м^2, учетная 50–100 м^2. Почвенные образцы отбирали перед закладкой опытов, в середине и конце ротации севооборотов после уборки урожая культур.

В 2011–2022 гг. динамику агрохимических свойств изучали в вариантах с тремя технологическими уровнями (фонами) возделывания культур: 1 – экстенсивный (без удобрений); 2 – среднеинтенсивный – нормальные технологии; 3 – интенсивный. При выращивании культур по фону 2 на 1 га севооборотной площади в среднем было внесено 90 кг NPK и 3,0 т компоста многоцелевого назначения (КМН), по фону 3 – 200 кг и 3,0 т соответственно. Одна тонна КМН по эффективности приравнивается к 3-4 т полуперепревшего навоза или торфонавозного компоста. Исследования были выполнены на дренированном и недренированном участках в плодосменном севообороте, развернутом во времени и пространстве, с чередованием культур: пар занятый (клевер) – озимые (рожь, тритикале) – картофель – яровая пшеница с подсевом клевера. Дренированный участок осушали закрытым гончарным дренажом, междренное расстояние 20 м, глубина заложения дрен 0,9–1,2 м. Опыт заложен в четырехкратной повторности, общая площадь делянок с технологическими вариантами 432 м^2, учетная для культур сплошного сева – 44 м^2, картофеля – 28 м^2. Почва обоих участков дерново-подзолистая легкосуглинистая глееватая, содержание подвижного фосфора перед закладкой опыта 120–240 мг/кг почвы, калия − 150–200 мг/кг и гумуса − 2,09–2,38 %, $pH_{сол.}$ – 4,4.

Таблица 1 – **Динамика содержания гумуса в пахотном слое почвы разных видов севооборотов /**
Table 1 – **Dynamics of humus content in the arable layer of soil in different types of crop rotations**

Номер, вид севооборота / Number, type of crop rotation	*Соотношение культур (в %) в севообороте (зерновые: пропашные : мн. травы) / Ratio of crops (in %) in crop rotation (grains : row crops : many grasses)*	*Внесение органических удобрений, т / Application of organic fertilizers, t*	*Масса растительных остатков, т / Mass of plant residues, t*	*Исходное содержание гумуса, % / Initial humus content, %*	*Изменения в содержании гумуса за ротацию, (± к исходному), % / Changes in humus content per rotation (± to original), %*
		на 1 га севооборотной площади / per 1 hectare of crop rotation area			
1. Семипольный зернотравяной с чистым паром / Seven-field grain-grass with bare fallow	57,2 : 14,3 : 28,6	6,0	4,82	2,23	-0,15
2. Семипольный зернотравяной с занятым паром / Seven-field grain-grass with seed fallow	71,4 : 0 : 28,6	6,0	5,28	2,37	0,05
3. Семипольный зернотравяной с сидеральным паром / Seven-field grain-grass with green manure fallow	57,2 : 0 : 42,8	6,0	5,84	1,90	0,41
4. Пятипольный зернотравяной / Five-field grain-grass	60,0 : 0 : 40,0	8,0	5,79	3,70	0,25
5. Восьмипольный зернотравяной / Eight-field grain-grass	75,0 : 0 : 25,0	12,5	5,14	1,81	0,40
6. Семипольный зернотравян пропашной с картофелем по пласту трав / Seven-field grain-grassrow with potatoes along a layer of grasses	57,2 : 14,3 : 28,6	6,0	4,96	2,34	-0,10
7. Восьмипольный зернотравяно-пропашной / Eight-field grain-grass-row	62,5 : 12,5 : 25,0	7,5	4,56	2,85	0,05
8. Пятипольный зернотравяно-пропашной / Five-field grain-grass-row	60,0 : 20,0 : 20,0	12,0	4,37	2,77	0,07
9. Четырехпольный зерновой / Four-field grain	100 : 0 : 0	15,0/1,3*	3,99	2,33	0,08
10. Четырехпольный зернопропашной / Four-field grain-row	50,0 : 50,0 : 0	15,0/1,8*	3,01	2,64	-0,07

Примечания: * в числителе – торфонавозный компост, в знаменателе – солома; приведены данные за две ротации. Исследования в севооборотах 1, 2, 3, 5, 6 проведены в 1979–1987 гг., в севообороте 4 – в 1978–1984 гг., в севооборотах 7, 8, 9, 10 – в 1984–1994 гг.

Notes: * in the numerator – peat manure compost, in the denominator – straw; data for two rotations are given. Research in crop rotations 1, 2, 3, 5, 6 was carried out in 1979–1987, in crop rotation 4 – in 1978–1984, in crop rotations 7, 8, 9, 10 – in 1984–1994.

Сопутствующие исследования, анализы и наблюдения в полевых опытах проводили по общепринятым в растениеводческой науке методикам опытного дела[2]. Содержание гумуса в почве определяли по методу И. В. Тюрина, групповой и фракционный состав гумуса – методом В. В. Пономаревой, Т. А. Плотниковой[3]. Почвенные образцы отбирали после уборки урожая на всех полях севооборота в четырехкратной повторности. Подготовка почвенных проб для анализа заключалась в удалении из почвы корешков и различных остатков растительного и животного происхождения, в растирании и просеивании образцов почвы, в тщательном очищении их от мелких корешков и детрита. Количество растительных остатков определяли методом Н. З. Станкова[4]. Статистическая обработка данных проведена методом дисперсионного анализа с помощью надстроек в Microsoft Office Excel 2019. При статистическом анализе использовали данные по содержанию гумуса, полученные в начале и конце проведения опыта, отражающие изменения гумуса за период исследований. Перед закладкой опыта различия в содержании гумуса между вариантами были несущественными.

Результаты и их обсуждение. Проведенные исследования показали, что на динамику содержания гумуса в пахотном слое почвы влияние оказывает целый комплекс факторов природного и антропогенного характера.

Растительные остатки являются одним из основных поставщиков органического вещества в почву. По количеству оставляемых растительных остатков и их качеству основные полевые культуры Нечерноземной зоны, в силу их биологических и технологических различий, разделяются на три принципиально отличающиеся группы: многолетние травы; зерновые; пропашные культуры; лен. Различие между культурами этих групп весьма значительное. По сравнению с ячменем, картофель оставляет растительных остатков в два раза меньше, а многолетние травы 2 г. п. – в 2,3 раза больше. По нашим исследованиям, в отдельных опытах после уборки урожая, при выращивании культур по базовой технологии, ячмень составлял от 3,25 до 4,87 т/га воздушно-сухой массы растительных остатков (РО) (наибольшее количество РО после ячменя оставалось при подсеве под него клевера), овес – от 3,10 до 4,18 т/га, озимая рожь – от 4,02 до 5,62 т/га, картофель – от 1,60 до 2,33 т/га, клевер – от 4,58 до 9,46 т/га, многолетние травы 2 г. п. – от 7,82 до 10,3 т/га, гречиха – 1,71 т/га, люпин зернового направления (сорт Ладный) – 3,52 т/га, перко (семейство рапсовых) – 4,40 т/га [12].

Масса растительных остатков находится в тесной взаимосвязи с уровнем урожайности культур. У овса при росте урожайности зерна с 2,30 до 3,73 т/га количество РО увеличивалось с 2,44 до 3,88 т/га воздушно-сухой массы, у ячменя в зависимости от уровня урожайности зерна количество растительных остатков изменялось от 3,15 до 4,57 т/га, у ржи – от 3,84 до 5,03 т/га, однолетних трав – от 2,70 до 4,19 т/га.

Большое влияние на развитие и характер распределения корневой системы оказывают погодные условия и режим увлажнения почвы. В засушливые годы растения формируют значительно более мощную и более глубоко расположенную корневую систему, чем во влажные.

Растительные остатки полевых культур существенно различаются по химическому составу, соотношению в них азота и углерода, скорости биохимических превращений органических остатков, коэффициентам гумификации и т. д. Среднее содержание азота в РО зерновых культур составило 0,73–0,99 %, клевера – до 1,81 %, картофеля – 1,80 %. При этом соотношение азота и углерода у зерновых культур находилось в пределах от 1:32,6 до 1:45,7, клевера, картофеля и горохоовсяной смеси – от 1:16,4 до 1:19,7. По массе поступающего в почву с растительными остатками азота выделились многолетние травы. После клевера, в среднем по шести опытам, в почву с растительными остатками поступило 138,6 кг азота, или в 2,7–5,0 раз больше, чем после зерновых культур. Значительные различия между растительными остатками культур отмечены также по содержанию в них фосфора и калия [12, 18].

Возделываемые культуры оказывали неодинаковое влияние на скорость минерализации имеющихся запасов гумуса и в целом на расходную часть баланса органического вещества почвы. Здесь основное значение имеет физическое состояние пахотного слоя почвы в течение технологического цикла выращивания культур, зависящее в основном от приемов их

[2]Проведение научных исследований на мелиорированных землях избыточно увлажненной части СССР: методические указания. М., 1984. 162 с.
[3]Пономарева В. В., Плотникова Т. А. Гумус и почвообразование: методы и результаты изучения. Л.: Наука, 1980. 221 с.
[4]Станков Н. З. Корневая система полевых культур. М.: Колос, 1964. 280 с.

возделывания и способов обработки почвы. Наиболее интенсивно минерализация органического вещества почвы протекает под пропашными культурами, медленнее – под зерновыми и другими культурами сплошного сева, а наиболее медленно – под многолетними травами, когда почва не подвергается физическому воздействию в течение двух-трех лет и более.

Влияние в целом севооборота на плодородие и содержание в почве гумуса определяется, прежде всего, видом севооборота, составом и структурой выращиваемых культур, агротехникой их возделывания. На первом месте по количеству растительных остатков, поступающих в пахотный слой почвы, находятся севообороты с многолетними травами: зернотравяные оставляли 4,82–5,84 т сухой массы на 1 га севооборотной площади; плодосменные – 4,37–4,96 т. В зернопропашных и зерновом севооборотах растительных остатков накапливалось в 1,5–1,9 раза меньше: в зерновом – 3,99 т, зернопропашном – 3,01 т на 1 га севооборотной площади (табл. 1).

В севооборотах с многолетними травами (клеверо-тимофеечная смесь) на количество растительных остатков, поступающих в почву, влияние могут оказывать их покровные культуры. От выбора покровной культуры зависит полевая всхожесть семян трав, прежде всего клевера, сохранность и развитие растений, их продуктивность и, как следствие, биомасса растительных остатков [12, 19].

В севооборотах, имеющих в своем составе паровое звено, важное значение для накопления растительных остатков имеет выбор парозанимающей культуры. Использование в качестве парозанимающей культуры клевера позволяет, по сравнению с однолетними травами, увеличить поступление в почву растительных остатков, накопление азота и сократить количество обработок. Увеличение количества поступающей в почву органической массы в этом звене севооборота может быть достигнуто за счет выращивания в паровом поле сидеральных и промежуточных культур [20].

Возделывание поукосных и пожнивных промежуточных культур (горчица белая и редька масличная) увеличивало, по сравнению с одной основной культурой, поступление органического вещества на 23,6–48,2 %. Дополнительное поступление растительных остатков в почву способствовало накоплению гумуса и увеличению биологической активности почвы. При поукосном возделывании горчицы белой и редьки масличной с их растительными остатками в почве оставалось 30,0–40,1 кг азота, 3,5–4,6 кг фосфора и 8,5–9,2 кг калия.

Виды севооборотов существенно различались по скорости минерализации органического вещества почвы – почти в два раза. В среднем по опытам в зернотравяном севообороте ежегодный объем минерализации составил 940 кг/га, или 1,26 % валового запаса, в зернопропашном с 50 % пропашных культур в структуре посевов – 1900 кг/га и 2,56 % соответственно. Скорость минерализации органического вещества в севообороте во многом определяется интенсивностью обработки почвы. В восьмипольном зернотравяном севообороте, по сравнению с восьмипольным зернотравянопропашным, количество механических обработок (вспашка, культивация) сокращается на 25 %, а в зернопропашном, наоборот, возрастает в два раза. В четырехпольном зернопропашном севообороте почва за две ротации подвергалась механическому воздействию 48 раз, а в восьмипольном зернотравянопропашном с двумя полями многолетних трав – 24 раза, что в два раза меньше. Данные длительных исследований по динамике содержания гумуса в пахотном слое разных видов полевых севооборотов на осушаемых минеральных почвах приведены в таблице 1.

Негативная динамика гумуса усиливается при введении в севооборот пропашных культур и чистого пара, при размещении по пласту многолетних трав картофеля и освоении севооборотов без трав. В таких севооборотах, чаще всего, наблюдается отрицательная динамика гумуса, возрастает потребность в ресурсах для поддержания его бездефицитного баланса. Введение в севооборот пропашной культуры усиливает процесс минерализации гумуса и оказывает дестабилизирующее воздействие на почву, включение многолетних трав в структуру севооборота, наоборот, значительно повышает ресурсовоспроизводящие возможности полевых севооборотов в отношении органического вещества почвы. Поэтому наиболее напряженный баланс гумуса складывается в пропашных и зернопропашных севооборотах, наименее – в зернотравяных; плодосменные и зерновые севообороты занимают промежуточное положение. В опыте с разными системами

воспроизводства почвенного плодородия установлено, что в зернотравянопропашном (плодосменном) севообороте (№7) за счет растительных остатков возделываемых культур восстанавливалось 56,6–76,5 % объема минерализованного гумуса, в зерновом – 51,8, зернопропашном – 26,4 %. В отдельных зернотравяных севооборотах складывались благоприятные условия для полного восстановления гумуса (88–112 %) за счет растительных остатков. Без внесения органических удобрений бездефицитный баланс гумуса получили в пятипольном зернотравяном севообороте, в структуре которого многолетние травы составляли 40 % с урожайностью 4,0–5,0 т сена с 1 га. Выявленные различия в динамике гумуса указывают на необходимость дифференцированного подхода к решению проблемы воспроизводства органического вещества почвы с учетом вида севооборота и уровня продуктивности растений. В плодосменных севооборотах, при сложившемся в опытах уровне урожайности культур, для сохранения запасов гумуса достаточно вносить на 1 га севооборотной площади 5,0–8,5 т качественных органических удобрений, в зернотравяных – не более 3,0 т/га, зерновом – 11,2 т/га, зернопропашном с 50 % пропашных – 23,4 т/га.

Виды севооборотов различаются по своему влиянию на качественный состав гумуса (фракционный состав, соотношение гуминовых и фульвокислот). Исследования проводили в плодосменном (зернотравянопропашном) (№7), зерновом (№9) и зернопропашном севооборотах (№10). В плодосменном севообороте баланс гумуса был положительным, в зерновом – нейтральным, зернопропашном – отрицательным. Изменения фракционного состава гумуса в пахотном слое почвы под влиянием этих видов севооборотов были во времени однонаправленными – за восьмилетний период в составе гумуса увеличился негидролизуемый остаток, уменьшилось количество гуминовых и фульвокислот. В плодосменном севообороте негидролизуемый остаток увеличился на 9,7 % (с 27,4 до 37,1 %), в зерновом − на 13,1 % (с 21,4 до 34,5 %), в зернопропашном – на 12,6 % (с 20,4 до 33,0 %). Количество фульвокислот соответственно севооборотам уменьшилось на 8,4, 7,5 и 11,0 %, гуминовых кислот – на 1,3, 4,6 и 1,6 %. Соотношение гуминовых и фульвокислот в плодосменном севообороте увеличилось с 0,63 до 0,74, в зернопропашном – с 0,62 до 0,75, в зерновом осталось без изменений – 0,63. Наиболее существенные качественные изменения в составе гумуса произошли в плодосменном севообороте – при положительном изменении в соотношении гумусовых кислот, в их составе уменьшилось относительное содержание агрессивных и связных фульвокислот. В зернопропашном севообороте перераспределение в составе гумуса произошло с участием не только всех групп фульвокислот, но и гуминовых кислот (связанных и прочно связанных), что указывает на разрушающее воздействие зернопропашного севооборота на гумусное состояние почвы. Освоение плодосменных севооборотов с многолетними травами следует рассматривать не только как способ сохранения запасов гумуса в осушаемой почве, но и как прием улучшения его качественного состава [12, 18].

Из технологических факторов, создающих условия для формирования в севооборотах бездефицитного, и тем более положительного, баланса гумуса, большое значение имеют удобрения [4, 7]. При их применении увеличивается поступление в почву органических веществ как за счет внесения в отдельных полях севооборота органических удобрений, так и за счет накопления большей массы растительных остатков. В вариантах с удобрениями поступление в почву растительных остатков увеличивалось в два и более раза, что оказывало существенное влияние на баланс органического вещества в пахотном слое почвы, создавало условия для его сохранения и расширенного воспроизводства.

Наши исследования в опыте с тремя технологическими уровнями (фонами) возделывания культур (при принятой системе внесения органических и минеральных удобрений) показали, что ежегодные потери гумуса, по сравнению с неудобренным фоном, уменьшались многократно. Без удобрений ежегодная убыль гумуса на осушаемом фоне, при его исходном содержании 2,20 %, составила 1370 кг/га, или 2,22 % от исходной массы, на неосушаемом фоне, при исходном содержании 2,44 % – 1540 кг/га и 2,25 % соответственно (табл. 2).

На осушаемом участке на фоне удобрений ежегодные потери гумуса снизились до 120 и 200 кг/га (0,21 и 0,34 % от валового запаса) соответственно вариантам – в 11,4 и 6,8 раза меньше, чем в варианте без удобрений. На неосушаемом участке при применении удобрений ежегодные потери гумуса также уменьшились, но менее

значительно – в 2,1 и 2,6 раза, по массе они оставались достаточно большими – 730 и 600 кг/га севооборотной площади. Влияние удобрений на баланс гумуса в условиях повышенного увлажнения, по сравнению с осушаемым фоном, снижалось в 6,1 и 3,0 раза. Как видно из данных, полученных в этом опыте, в динамику гумуса дерново-подзолистой легкосуглинистой глееватой почвы, определенные изменения вносит система дренажа.

Таблица 2 – **Влияние удобрений на динамику содержания гумуса в плодосменном севообороте (пахотный слой) (2011–2022 гг.) /**
Table 2 – **The effect of fertilizers on the dynamics of humus content in grain-grass-row crop rotation (arable layer) (2011–2022)**

Вариант удобрений / Variant of fertilizer	*Содержание гумуса, % / Humus content, %*		*Изменение в содержании гумуса (± за 10 лет), % / Change in humus content (± over 10 years), %*	*$НСР_{05}$ / LSD_{05}*	*Ежегодные потери гумуса / Annual humus loss*	
	перед закладкой опыта в 2011 г. / before laying down the experiment in 2011	*в 2021-2022 гг. / in 2021-2022*			*кг/га / kg/ha*	*% от начальной массы / % of initial weight*
Почва – осушаемая дерново-подзолистая легкосуглинистая глееватая / Soil – drained soddy podzolic light loamy gleyic						
Без удобрений / No fertilizers	2,20	1,71	-0,49	0,17	1370	2,22
Средние нормы / Average norms	2,00	1,98	-0,02	Различия незначимы / The differences are insignificant	120	0,21
Высокие нормы / High standards	2,07	2,00	-0,07		200	0,34
Почва – неосушаемая дерново-подзолистая легкосуглинистая глееватая / Soil – undrained soddy-podzolic light loamy gleyic						
Без удобрений / No fertilizers	2,44	1,89	-0,55	0,45	1540	2,25
Средние нормы / Average norms	2,36	2,10	-0,26	0,21	730	1,10
Высокие нормы / High standards	2,27	2,05	-0,22	Различия незначимы / The differences are insignificant	600	0,94

Примечания: Результаты дисперсионного анализа динамики гумуса по схеме двухфакторного опыта: осушаемая почва – $НСР_{05}$ для фактора А (варианты удобрений) – 0,12 %; для фактора В (фактор времени) – 0,10, неосушаемая почва – 0,28 и 0,16 соответственно /

Notes: Results of variance analysis of humus dynamics according to a two-factor experiment: in the variant with drained soil – LSD_{05} for factor A (fertilizer variants) – 0.12 %; for factor B (time factor) – 0.10, with non-drained soils – 0.28 and 0.16, respectively

Наблюдения за содержанием гумуса в осушаемой и неосушаемой почвах были проведены в двух опытах – в пахотном слое плодосменного севооборота (табл. 3). Первый опыт охватывает первые 10 лет использования объекта мелиорации «Губино», второй – последние 10 лет 40-летнего периода использования почвы в осушаемом режиме. В первом опыте для сохранения в почве запасов гумуса на 1 га севооборотной площади вносили 12,0 т торфонавозного компоста, во втором – 3,0 т компоста многоцелевого назначения и запахивали солому озимых культур. На осушаемом участке за 10 лет значимых изменений в содержании гумуса не отмечено, в этих же технологических условиях на неосушаемой почве содержание гумуса снизилось на 0,18 и 0,22 абс. %. Потери гумуса в осушаемой почве, по сравнению с неосушаемой, были существенно меньше.

Таблица 3 – **Влияние осушения на динамику содержания гумуса в плодосменном севообороте (пахотный слой, на фоне удобрений) /**
Table 3 – **The effect of drainage on the dynamics of humus content in grain-grass-row crop rotation (arable layer, against the background of fertilizers)**

Почва / Soil	*Номер опыта / Experiment number*	*Содержание гумуса, % / Humus content, %*		*Изменения в содержании гумуса (± за 10 лет), % / Change in humus content (± over 10 years), %*	*$НСР_{05}$ / LSD_{05}*
		начало опыта / start of experiment	*окончание опыта / end of experiment*		
Неосушаемая дерново-подзолистая легкосуглинистая глееватая / Undrained soddy-podzolic light loamy gleyic	1	2,11	1,93	-0,18	0,19
	2	2,27	2,05	-0,22	0,21
	Среднее / Average	2,19	1,99	-0,20	0,15
Осушаемая дерново-подзолистая легкосуглинистая глееватая / Drainable soddy-podzolic light loamy gleyic	1	2,77	2,84	0,07	Различия незначимы / The differences are insignificant
	2	2,07	2,00	-0,07	
	Среднее / Average	2,42	2,42	0,00	

Примечания: Опыт 1 – начало в 1983–1985 гг., окончание в 1994-1995 гг.; опыт 2 – начало в 2011 г., окончание в 2021-2022 гг. /

Notes: Experiment 1 – the beginning of the experiment is in 1983–1985, the end is in 1994-1995; experiment 2 – the beginning of the experiment is in 2011, the end is in 2021-2022

Положительное влияние осушения на динамику гумуса связано, видимо, с тем, что осушение коренным образом изменяет водно-воздушный режим почвы и условия гумификации органического вещества в пахотном слое. Дренаж существенно уменьшает продолжительность периода нахождения почвы в состоянии избыточного увлажнения с активным участием анаэробного процесса в разложении органического вещества. Наиболее благоприятным для накопления гумуса является сочетание в почве оптимального гидротермического и водно-воздушного режимов при периодически повторяющемся некотором иссушении почвы[5]. В этих условиях происходит активное разложение органических остатков, достаточно энергичная гумификация и закрепление образующихся гумусовых веществ минеральной частью почвы. При постоянном или временном избыточном увлажнении почвы в составе гумуса образуется относительно большое количество фульвокислот, которые создают с кальцием, магнием, калием и другими основаниями растворимые соли, мигрирующие по профилю почвы с водой[6]. Важной качественной характеристикой почвы, позволяющей судить об условиях гумификации и свойствах почвы, является отношение гуминовых и фульвокислот в составе гумуса. Под влиянием осушения это отношение в рассматриваемом опыте существенно увеличилось – с 0,61 до 0,88.

Как показали наши исследования, в осушаемой почве активное влияние на скорость и направленность биохимических превращений растительных остатков могут оказывать гидротермические условия первой половины вегетации. Так, в зерновом севообороте №9 (1985–1993 гг.) в годы с прохладной и дождливой погодой в мае-июне содержание гумуса в пахотном слое в конце вегетационного периода снижалось, в годы с засушливыми условиями – как правило, повышалось (рис. 1). Аналогичные результаты были получены в плодосменном севообороте (2014–2022 гг.) (рис. 2). Коэффициенты корреляции содержания гумуса с гидротермическими условиями мая и июня составили r = -0,84 и r = -0,95 соответственно севооборотам.

Связано это, видимо с тем, что процесс закрепления гуминовых кислот, накопившихся в почве в осенне-весенний периоды, при наступлении в первой половине вегетации определенной засушливости почвенной среды протекает более активно, чем при высокой влажности почвы в этот период. При этом, уровень минерализации и интенсивность биологических процессов разрушения гуминовых веществ в условиях дефицита влаги замедляются[7].

[5]Почвоведение. Под ред. И. С. Кауричева. Изд.2-е, перераб. и доп. М.: Колос, 1975. 496 с.
[6]Там же.
[7]Там же.

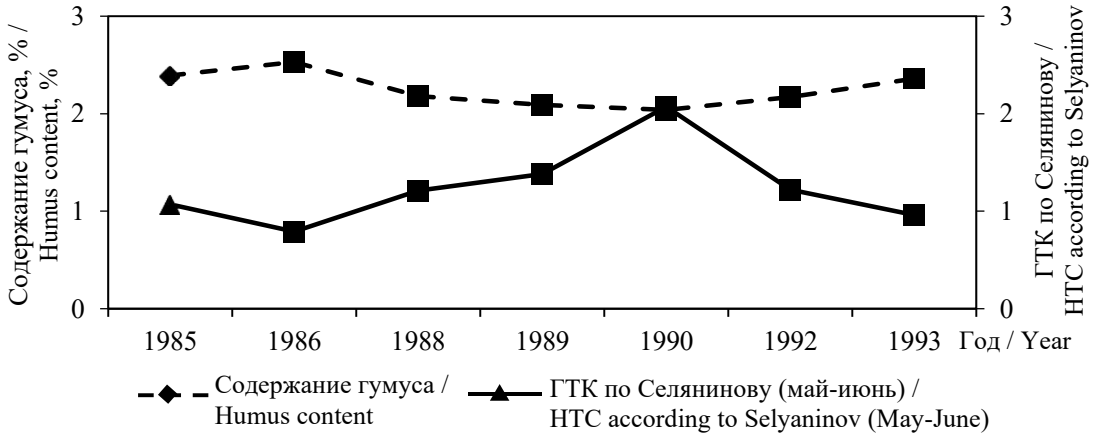

Рис. 1. **Динамика содержания гумуса в почве зернового севооборота в зависимости от гидротермических условий вегетации /**

Fig. 1. **Dynamics of humus content in the soil of grain crop rotation in dependence to hydrothermal conditions of vegetation**

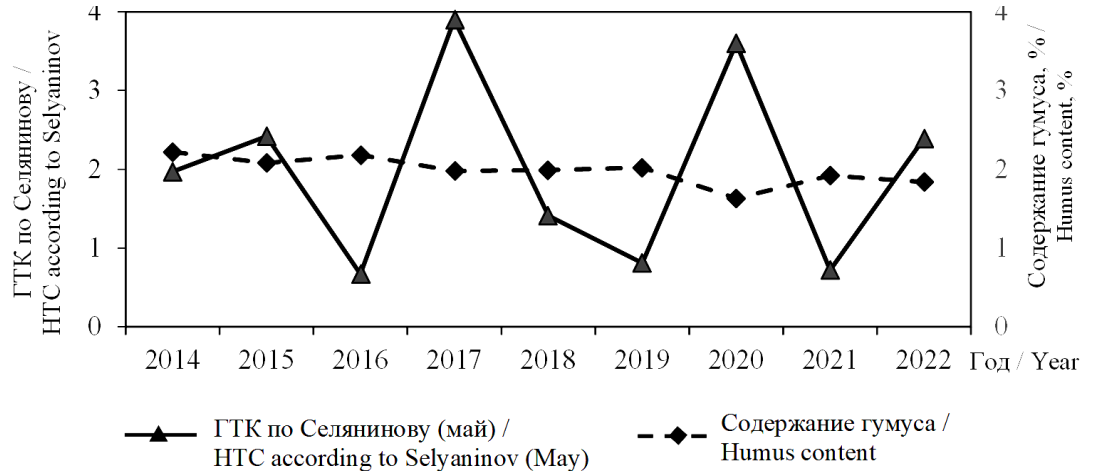

Рис. 2. **Динамика содержания гумуса в почве плодосменного севооборота в зависимости от гидротермических условий вегетации /**

Fig. 2. **Dynamics of humus content in the soil of grain-grass-row crop rotation in dependence to hydrothermal conditions of vegetation**

В условиях повышенного увлажнения почвы, наоборот, процессы минерализации органического вещества активизируются, усиливается вымывание водорастворимых форм гуминовых кислот в нижележащие горизонты. Подтверждением этому служат наблюдения за целлюлозоразрушающей активностью почвы – на переувлажняемом участке она в пахотном слое в 1,8 раза выше, чем на осушаемом [21].

Это явление необходимо учитывать при анализе динамики гумуса в севооборотах и разработке способов более эффективной гумификации растительных остатков.

На осушаемых землях при оценке динамики гумуса в севооборотах, прежде всего на начальном этапе их освоения, важно учитывать разнообразие агроэкологических видов земель, состояние водного режима почв до и после проведения осушения. При смене режима использования переувлажняемых дерново-подзолистых почв, преимущественно глеевых, изменения в содержании гумуса, в зависимости от его исходных параметров, могут быть значительными и труднорегулируемыми. Перевод переувлажняемых территорий с глеевыми почвами после осушения в пахотный режим их использования с активизацией механических обработок приводит к наиболее глубоким, по сравнению с другими почвами, нарушениям сложившегося в них природного равновесия в процессах накопления и минерализации органического вещества. При использовании дерново-подзолистой глеевой почвы в плодосменном севообороте в первые 11 лет после осушения содержание гумуса в пахотном слое снизилось с 4,50 до 3,64 % (табл. 4), ежегодная убыль составила 2190 кг/га.

Таблица 4 – **Динамика содержания гумуса в пахотном слое почв разных агроэкологических видов, %**
Table 4 – **Dynamics of humus content in the arable layer of soils of different agroecological types, %**

Период определения / The period of determination	*Дерново-подзолистая почва / Soddy-podzolic soil*				
	автоморфная / automorphic	*осушаемая / drained*			*неосушаемая глееватая / undrained gleyic*
		слабооглеенная / weakly gleyed	*глееватая / gleyic*	*глеевая / gleyed*	
Начало опыта (1983–1985 гг.) / Beginning of experiment (1983–1985)	1,53	2,28	2,77	4,50	2,11
Окончание опыта (1993-1994 гг.) / End of experiment (1993-1994)	1,62	2,40	2,84	3,64	1,93
Изменения / Changes	0,09	0,12	0,07	-0,86	-0,18

В слабооглеенной и глееватой дерново-подзолистых почвах содержание гумуса (в этих же условиях) повысилось на 0,07–0,12 абс. %, масса гумуса в пахотном слое ежегодно увеличивалась на 200–300 кг в пересчете на 1 га севооборотной площади. В результате за время проведения опыта произошло определенное выравнивание почвенного покрова опытного участка по содержанию гумуса в пахотном слое – разница в содержании гумуса между крайними вариантами осушаемых почв за время проведения опыта снизилась с 2,22 до 1,24 %. Проблема гумусового режима почв на объектах мелиорации со сложной структурой почвенного покрова должна решаться с учетом каждого агроэкологического вида земель, что становится возможным при организации земледелия на осушаемых почвах с использованием агроэкологически и технологически сбалансированных видов севооборотов и экономически обоснованных систем воспроизводства в этих севооборотах органического вещества почвы.

Заключение. Исследования показали, что виды севооборотов по массе органического вещества, поступающего в почву с растительными остатками культур, и скорости минерализации гумуса различаются почти в два раза и размещаются в следующем порядке убывания: зернотравяные, плодосменные, зерновые, зернопропашные. За счет растительных остатков в плодосменном севообороте восстанавливалось 56,6–76,5 % объема минерализованного гумуса, в зерновом – 51,8 %, зернопропашном – 26,4 %. Освоение севооборотов с многолетними травами является способом улучшения баланса гумуса и его качественного состава. При положительном балансе гумуса соотношение гуминовых и фульвокислот в плодосменном севообороте увеличилось с 0,63 до 0,74.

Установлено, что применение органических и минеральных удобрений существенно изменяет баланс гумуса в пахотном слое почвы. При органоминеральной системе удобрения количество растительных остатков, поступающих в почву, увеличивалось в два и более раза, ежегодные потери гумуса (кг/га) в плодосменном севообороте на осушаемом участке снижались в 6,8–11,4 раза, на неосушаемом – в 2,1–2,6 раза. При использовании в качестве органического удобрения КМН (компост многоцелевого использования, продукт биоферментации) для сохранения запасов гумуса в плодосменном севообороте необходимо вносить на 1 га не менее 3,0 тонн этого удобрения.

Важным условием улучшения баланса гумуса в полевых севооборотах на переувлажняемых почвах является их дренирование. При сбалансированной системе удобрения осушение уменьшает убыль гумуса, делает баланс гумуса менее дефицитным и более устойчивым, повышает роль удобрений в накоплении гумуса, улучшает качественные параметры гумуса. Соотношение гуминовых и фульвокислот в составе гумуса под влиянием осушения увеличилось с 0,61 до 0,88. Выявлено влияние на динамику гумуса гидротермических условий. Наиболее благоприятные условия для накопления гумуса создаются в годы с засушливой первой половиной вегетационного периода – в эти годы в пахотном слое севооборота наблюдается повышение содержания гумуса, в избыточно влажные, наоборот, – понижение. Коэффициенты корреляции содержания гумуса с гидротермическими условиями мая-июня составили -0,84 и -0,95. На осушаемых землях со сложной структурой почвенного покрова при формировании бездефицитного баланса гумуса в севооборотах важно учитывать разнообразие агроэкологических видов земель, их почвенно-гидрологическую пестроту, уровень гумусированности, состояние водного режима почв до и после проведения осушения.

Список литературы

1. Kiryushin V. I. The management of soil fertility and productivity of agrocenoses in adaptive-landscape farming systems. Eurasian Soil Science. 2019;52(9):1137–1145. DOI: https://doi.org/10.1134/S1064229319070068 EDN: FHEBPH

2. Кирюшин В. И. Научно-инновационное обеспечение приоритетов развития сельского хозяйства. Достижения науки и техники АПК. 2019;33(3):5–10. DOI: https://doi.org/10.24411/0235-2451-2019-10301 EDN: HZAGFN

3. Vasbieva M. T., Zavyalova N. E., Shishkov D. G. Changes in the agrochemical properties of albic retisol (abruptic, aric, loamic) during a long-term use of nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizers under Cis-Ural. Eurasian Soil Science. 2022;55(11):1623–1632. DOI: https://doi.org/10.1134/S1064229322110138 EDN: QDIQIC

4. Завьялова Н. Е., Фомин Д. С., Тетерлев И. С. Фракционно-групповой состав гумуса дерново-подзолистой почвы при различном землепользовании. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2018;4(65):82–86.
DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2018.65.4.82-86 EDN: UWAIZE

5. Новоселов С. И., Кузьминых А. Н., Еремеев Р. В. Плодородие почвы и продуктивность сельскохозяйственных культур в зависимости от основной обработки и севооборота. Плодородие. 2019;(6(111)):22–25.
DOI: https://doi.org/10.25680/S19948603.2019.111.06 EDN: TOCOSL

6. Semenov V. M., Zinyakova N. B., Lebedeva T. N., Tulina A. S., Kogut B. M., Masyutenko N. P., Malyukova L. S. Biologically active organic matter in soils of European Russia. Eurasian Soil Science. 2018;51(4):434–447.
DOI: https://doi.org/10.1134/S1064229318040117 EDN: XXMDTN

7. Дьяченко Е. Н., Разина А. А., Шевелев А. Т., Дятлова О. Г. Технология комплексного применения удобрений, химических и биологических мелиорантов, средств защиты растений в плодосменном севообороте. Земледелие. 2018;(3):28–31. DOI: https://doi.org/10.24411/0044-3913-201810306 EDN: YWZHUD

8. Овчинникова М. Ф. Свойства и продуктивность дерново-подзолистых почв при длительном осушении в разных агроусловиях. Плодородие. 2019;(5(110)):34–37. DOI: https://doi.org/10.25680/S19948603.2019.110.10 EDN: VEWQHD

9. Hirte J., Walder F., Hess J., Büchi L., Colombi T., van der Heijden M. G., Mayer J. Enhanced root carbon allocation through organic farming is restricted to topsoils. Science of the Total Environment. 2021;755(2):143551.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143551

10. Ахметзянов М. Р., Таланов И. П. Влияние приемов основной обработки почвы и растительной биомассы на продуктивность культур в звене севооборота. Плодородие. 2019;(5(110)):41–45 DOI: https://doi.org/10.25680/S19948603.2019.110.12 EDN: WGYZER

11. Козлова Л. М., Носкова Е. Н., Попов Ф. А. Совершенствование севооборотов для сохранения плодородия почвы и увеличения их продуктивности в условиях биологической интенсификации. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2019;20(5):467–477. DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2019.20.5.467-477 EDN: JRQJQM

12. Митрофанов Ю. И. Адаптивные севообороты и технологии на осушаемых землях Нечерноземной зоны. Тверь: АгросферА, 2009. 210 с.

13. Шрамко Н. В., Вихорева Г. В. Роль биологизированных севооборотов в изменении содержания гумуса в дерново-подзолистых почвах Верхневолжья. Земледелие. 2016;(1):14–15.

14. Карабутов А. П., Соловиченко В. Д., Никитин В. В., Навольнева Е. В. Воспроизводство плодородия почв, продуктивность и энергетическая эффективность севооборотов. Земледелие. 2019;(2):3–8.
DOI: https://doi.org/10.24411/0044-3913-2019-10201 EDN: YXVHJJ

15. Байбеков Р. Ф., Хайдуков К. П., Коваленко А. А., Забугина Т. М. Качественный состав органического вещества дерново-подзолистой почвы в длительном полевом опыте. Земледелие. 2020;(1):8–11.
DOI: https://doi.org/10.24411/0044-3913-2020-10102 EDN: QNPYKG

16. Эседуллаев С. Т., Касаткин С. А. Использование сидеральных культур и их смесей при выращивании картофеля в Верхневолжье. Земледелие. 2021;(6):16–20. DOI: https://doi.org/10.24412/0044-3913-2021-6-16-20 EDN: ZLWDRG

17. Debska B. Content and changes in dissolved organic matter in meadow and arable soils over time. Polish Journal of Soil Science. 2019;52(2):183. DOI: https://doi.org/10.17951/pjss.2019.52.2.183

18. Митрофанов Ю. И. Совершенствование севооборотов на осушаемых землях. Международный сельскохозяйственный журнал. 2021;(5(383)):106–110. DOI: https://doi.org/10.24412/2587-6740-2021-5-106-110 EDN: QMZZBV

19. Митрофанов Ю. И. Особенности земледелия на осушаемых почвах. Международный сельскохозяйственный журнал. 2022;(4(388)):423–428. DOI: https://doi.org/10.55186/25876740_2022_65_4_423 EDN: BOGJJQ

20. Митрофанов Ю. И. Мелиоративно-паровое звено в севооборотах на осушаемых землях Нечерноземной зоны. Мелиорация и водное хозяйство. 2018;(1):10-13. Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=32529971 EDN: YQRJIO

21. Петрова Л. И., Митрофанов Ю. И., Первушина Н. К. Влияние осушения и технологий возделывания на урожай яровой пшеницы. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2018;64(3):70–74.
DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2018.64.3.70-74 EDN: USMKLX

References

1. Kiryushin V. I. The management of soil fertility and productivity of agrocenoses in adaptive-landscape farming systems. Eurasian Soil Science. 2019;52(9):1137–1145. DOI: https://doi.org/10.1134/S1064229319070068

2. Kiryushin V. I. Scientific and innovative support of priorities of agricultural development. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK* = Achievements of Science and Technology of AICis. 2019;33(3):5–10. (In Russ.).
DOI: https://doi.org/10.24411/0235-2451-2019-10301

3. Vasbieva M. T., Zavyalova N. E., Shishkov D. G. Changes in the agrochemical properties of albic retisol (abruptic, aric, loamic) during a long-term use of nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizers under Cis-Ural. Eurasian Soil Science. 2022;55(11):1623–1632. DOI: https://doi.org/10.1134/S1064229322110138

4. Zavyalova N. E., Fomin D. S., Teterlev I. S. Fractional and group humus composition of the sod-podzolic soils under different land use. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2018;65(4):82–86. (In Russ.).
DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2018.65.4.82-86

5. Novoselov S. I., Kuz'minykh A. N., Eremeev R. V. The influence of fallow types and methods of primary tillage on soil fertility and productivity crop rotation. *Plodorodie*. 2019;(6(111)):22–25. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.25680/S19948603.2019.111.06

6. Semenov V. M., Zinyakova N. B., Lebedeva T. N., Tulina A. S., Kogut B. M., Masyutenko N. P., Malyukova L. S. Biologically active organic matter in soils of European Russia. Eurasian Soil Science. 2018;51(4):434–447. DOI: https://doi.org/10.1134/S1064229318040117

7. Djachenko E. N., Razina A. A., Shevelev A. T., Dyatlova O. G. Technology of complex application of fertilizers, chemical and biological ameliorants, plant protection means in a crop rotation. *Zemledelie*. 2018;(3):28–31. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.24411/0044-3913-201810306

8. Ovchinnikova M. F. Properties and productivity of soddy-podzolic soils under the impact of long-term drainage in different agrogenic conditions. *Plodorodie*. 2019;(5(110)):34–37. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.25680/S19948603.2019.110.10

9. Hirte J., Walder F., Hess J., Büchi L., Colombi T., van der Heijden M. G., Mayer J. Enhanced root carbon allocation through organic farming is restricted to topsoils. Science of the Total Environment. 2021;755(2):143551. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143551

10. Akhmetzyanov M. R., Talanov I. P. Influence of principles of basic tilling of soil and vegetable biomass on productivity of crops in the part of crop rotation. *Plodorodie*. 2019;(5(110)):41–45 (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.25680/S19948603.2019.110.12

11. Kozlova L. M., Noskova E. N., Popov F. A. Improvement of crop rotations aimed at increasing their efficiency and conserving soil fertility in conditions of biological intensification. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2019;20(5):467–477. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2019.20.5.467-477

12. Mitrofanov Yu. I. Adaptive crop rotations and technologies on drained lands of the Non-Chernozem zone. Tver': *AgrosferA*, 2009. 210 p.

13. Shramko N. V., Vikhoreva G. V. Role of biologized crop rotations in humus content change in sod-podzol soils of the upper volga region. *Zemledelie*. 2016;(1):14–15. (In Russ.).

14. Karabutov A. P., Solovichenko V. D., Nikitin V. V., Navol'neva E. V. Reproduction of soil fertility, productivity and energy efficiency of crop rotations. *Zemledelie*. 2019;(2):3–8. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.24411/0044-3913-2019-10201

15. Baybekov R. F., Khaydukov K. P., Kovalenko A. A., Zabugina T. M. Qualitative composition of organic matter in sod-podzolic soil in a long field experiment. *Zemledelie*. 2020;(1):8–11. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.24411/0044-3913-2020-10102

16. Esedullaev S. T., Kasatkin S. A. The use of green manure crop and their mixtures in potato cultivation in the upper Volga region. *Zemledelie*. 2021;(6):16–20. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.24412/0044-3913-2021-6-16-20

17. Debska B. Content and changes in dissolved organic matter in meadow and arable soils over time. Polish Journal of Soil Science. 2019;52(2):183. DOI: https://doi.org/10.17951/pjss.2019.52.2.183

18. Mitrofanov Yu. I. Improvement of crop rotations on drained lands. *Mezhdunarodnyy sel'skokhozyaystvennyy zhurnal* = International Agricultural Journal. 2021;(5(383)):106–110. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.24412/2587-6740-2021-5-106-110

19. Mitrofanov Yu. I. Features of agriculture on drained soils. *Mezhdunarodnyy sel'skokhozyaystvennyy zhurnal* = International Agricultural Journal. 2022;(4(388)): 423–428. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.55186/25876740_2022_65_4_423

20. Mitrofanov Yu. I. Meliorative-fallow link of crop rotation on drained lands Non-Chernozem zone. *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo* = Melioration and Water Management. 2018;(1):10-13. (In Russ.). URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=32529971

21. Petrova L. I., Mitrofanov Yu. I., Pervushina N. K. Effect of drainage and application of mineral fertilizers on the yield of spring wheat. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2018;64(3):70–74. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2018.64.3.70-74

Сведения об авторах

✉ **Митрофанов Юрий Иванович,** кандидат с.-х. наук, ведущий научный сотрудник отдела мелиоративного земледелия, Всероссийский научно-исследовательский институт мелиорированных земель – филиал ФГБНУ Федеральный исследовательский центр «Почвенный институт имени В. В. Докучаева», д. 27, п. Эммаус, Калининский р-н, Тверская обл., Российская Федерация, 170530, e-mail: 2016vniimz-noo@list.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0994-6743**

Первушина Наталья Константиновна, научный сотрудник отдела мелиоративного земледелия, Всероссийский научно-исследовательский институт мелиорированных земель – филиал ФГБНУ Федеральный исследовательский центр «Почвенный институт имени В. В. Докучаева», д. 27, п. Эммаус, Калининский р-н, Тверская обл., Российская Федерация, 170530, e-mail: 2016vniimz-noo@list.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0618-4405**

Information about the authors

✉ **Yuriy I. Mitrofanov,** PhD in Agricultural Science, leading researcher, the Department of Reclamation Agriculture, All-Russian Research Institute of Reclaimed Lands – Branch of the Federal Research Centre V. V. Dokuchaev Soil Science Institute, 27, Emmauss village, Kalininsky district, Tver region, Russian Federation, 170530, e-mail: 2016vniimz-noo@list.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0994-6743**

Natalya K. Pervushina, researcher, the Department of Reclamation Agriculture, All-Russian Research Institute of Reclaimed Lands – Branch of the Federal Research Centre V. V. Dokuchaev Soil Science Institute, 27, Emmauss village, Kalininsky district, Tver region, Russian Federation, 170530, e-mail: 2016vniimz-noo@list.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0618-4405**

✉ – Для контактов / Corresponding author

https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.1.75-81
УДК 636.082.2

(cc) BY

Частота встречаемости генотипов k-казеина и их влияние на молочную продуктивность коров холмогорской породы

© 2024. Н. А. Худякова, И. С. Кожевникова, Е. Н. Щипакова, А. А. Кондакова✉, М. С. Калмыкова

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

Для повышения объемов отечественной молочной продукции необходимо использовать современные методы селекции и отбор животных проводить с высоким генетическим потенциалом. Для определения генетического потенциала животных используют молекулярно-генетические маркеры, которые позволяют изучать, как конкретный генетический вариант или комбинация генов влияют на желаемый признак. Цель исследования – выявить частоту встречаемости аллельных вариантов гена каппа-казеина (CSN3) у коров холмогорской породы и их взаимосвязи с молочной продуктивностью. Объект исследования – 195 коров. Для определения генотипов каппа-казеина использован метод полимеразной цепной реакции полиморфизма длин рестрикционных фрагментов. Исследования проводили в 2023 г. на базе АО «Холмогорский племзавод» (Архангельская область). В результате исследований установлено – в стаде доминирует аллель А гена каппа-казеина – 80 %, аллель В составила 20 %. Преобладающий генотип – АА – 63,08 % (n = 123), реже встречающийся генотип АВ – 33,33 % (n = 65), наименее распространенный генотип – ВВ – 3,59 % (n = 7). Для оценки молочной продуктивности и качества молока у коров с разными генотипами CSN3 сравнили показатели продуктивности за последнюю законченную лактацию. Общее количество коров с законченной лактацией в исследуемой выборке составило 130 голов из них: 37 коров-первотелок, 6 – по второй лактации и 87 – по третьей и более лактации. В совокупности по результатам сравнения наивысшие показатели имели коровы с генотипом ВВ: удой – 6916±275 кг, массовая доля жира – 4,14±0,22 %, массовая доля белка – 3,16±0,07 %, количество молочного жира – 286±19 кг, количество молочного белка – 219±12 кг. Таким образом, желательным генотипом по гену CSN3 является ВВ. На данный момент носителей этого гена крайне мало, поэтому необходимо вести селекционно-племенную работу, направленную на увеличение их численности.

Ключевые слова: *каппа-казеин, аллель, холмогорская порода, крупный рогатый скот, Архангельская область*

***Благодарности*:** работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н. П. Лаверова Уральского отделения Российской академии наук (тема № FUUW-2024-0006, регистрационный номер 1023032200133-8-4.2.1).

Авторы благодарят руководство и специалистов АО «Холмогорский племзавод» за содействие в сборе материалов, рецензентов журнала – за их вклад в экспертную оценку этой работы.

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

***Для цитирования**:* Худякова Н. А., Кожевникова И. С., Щипакова Е. Н., Кондакова А. А., Калмыкова М. С. Частота встречаемости генотипов k-казеина и их влияние на молочную продуктивность коров холмогорской породы. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2024;25(1):75–81. DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.1.75-81

Поступила: 01.09.2023 Принята к публикации: 25.01.2024 Опубликована онлайн: 28.02.2024

Frequency of occurrence of k-casein genotypes and their effect on the milk productivity of Kholmogory cows

© 2024. Natalia A. Khudyakova, Irina S. Kozhevnikova, Ekaterina N. Shchipakova, Alena A. Kondakova✉, Maria S. Kalmykova

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

To increase the volume of domestic dairy products, it is necessary to use modern breeding methods and select animals with high genetic potential. To determine the genetic potential of animals, molecular genetic markers are used, which make it possible to study how a specific genetic variant or combination of genes affects the desired trait. The purpose of the study is to identify the frequency of occurrence of allelic variants of the kappa-casein gene (CSN3) in Kholmogory cows and their relationship with milk production. The object of the study is 195 cows. To determine the genotypes of kappa-casein, the method of polymerase chain reaction of restriction fragment length polymorphism was used. The research was carried out in 2023 on the basis of JSC Kholmogorsky Breeding Plant (Arkhangelsk region). Results: in the studied herd, allele A of the kappa-casein gene dominates – 80 %, respectively, allele B was 20 %. The predominant genotype is AA – 63.08 % (n = 123), the less common genotype AB is 33.33 % (n = 65), the least common genotype is BB – 3.59 % (n = 7). To assess milk productivity and

milk quality in cows with different CSN3 genotypes, productivity indicators for the last completed lactation were compared. The total number of cows with completed lactation in the study sample was 130 heads, of which: 37 cows were first-calf heifers, 6 cows in the second lactation and 87 cows in the third or more lactation. In total, according to the comparison results, cows with the BB genotype had the highest indicators: milk yield – 6916±275 kg, mass fraction of fat – 4.14±0.22 %, mass fraction of protein – 3.16±0.07 %, amount of milk fat – 286±19 kg, amount of milk protein – 219±12 kg. Thus, the desired genotype for the CSN3 gene is BB. At the moment, there are very few carriers of this gene, so it is necessary to carry out selection and breeding work aimed at increasing their numbers.

Key words: *kappa-casein, allele, Kholmogory breed, cattle, Arkhangelsk region*

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 N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (No. of theme FUUW-2024-0006, registration number –1023032200133-8-4.2.1).

The authors thank the management and specialists of JSC Kholmogorsky Breeding Plant for their help in collecting the material. The authors also thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

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

For citation: Khudyakova N. A., Kozhevnikova I. S., Shchipakova E. N., Kondakova A. A., Kalmykova M. S. Frequency of occurrence of k-casein genotypes and their effect on the milk productivity of Kholmogory cows. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2024;25(1):75–81. (In Russ.).
DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.1.75-81

Received: 01.09.2023 Accepted for publication: 25.01.2024 Published online: 28.02.2024

В настоящее время молочная промышленность испытывает необходимость в увеличении объёмов поставляемого высококачественного сырья для производства молочной продукции. Достичь этой цели представляется возможным путём улучшения хозяйственно ценных показателей у крупного рогатого скота через определение наиболее благоприятных генотипов животных [1, 2, 3].

Несмотря на то, что ещё в 1991 году генотип каппа-казеина был признан, как экономически ценный селекционный маркер при оценке молочной продуктивности коров, споры о его влиянии на хозяйственно ценные признаки до сих пор актуальны.

Многие авторы утверждают, что аллель B гена CSN3 положительно влияет на количественные и качественные показатели молока у крупного рогатого скота в рамках доминантных, рецессивных и аддитивных генетических моделей [4, 5].

Известно, что генотип BB имеет превосходство над AA и AB по выходу готовой продукции (сыр), технологическим свойствам молока, содержанию белка, сухого вещества и лактозы. Для производства сыра и творога гораздо больше подходит молоко коров с генотипом BB, так как они обладают лучшими органолептическими свойствами и композицией. В то же время, многие исследователи считают молоко животных с генотипом AA более подходящим для реализации в качестве питьевого молока или сырья для производства других молочных продуктов [6, 7, 8].

В отечественной литературе также наблюдается расхождение мнений по поводу влияния генотипов k-казеина на хозяйственно полезные признаки. Так, например, ряд авторов обнаружил, что удой молока, содержание жира и белка в молоке увеличивается у животных с генотипом AA CSN3 [9, 10, 11].

При этом многие ученые утверждают, что генотип BB по CSN3 чаще всего характеризуется более высокими показателями содержания белка и жира, удоя и технологическими свойствами молока у коров разных пород, поэтому производство молока от коров с генотипом BB является наиболее выгодным [12, 13, 14]. Также было установлено, что аллель B связана с более высоким содержанием белка и лучшими свойствами свертываемости молока. Вследствие чего было показано, что высококачественный твердый сыр может быть получен только из молока коров с генотипом BB каппа-казеина [15, 16, 17].

Таким образом, генотип BB по CSN3 является прибыльным для производства молока и молочной продукции высокого качества. Коровы с таким генотипом обладают лучшими технологическими свойствами молока и способны давать больший удой. Кроме того, генотип BB по каппа-казеину является ключевым для производства высококачественных твёрдых сыров.

Цель исследования – выявить частоту встречаемости различных аллельных вариантов CSN3 у коров холмогорской породы и их взаимосвязи с молочной продуктивностью.

Научная новизна – исследовано маточное поголовье (195 голов) одного из ведущих племенных хозяйств Архангельской области на частоту встречаемости генотипов CSN3 каппа-казеина и его влияние на молочную продуктивность коров холмогорской породы.

Материал и методы. В ходе исследований изучен полиморфизм CSN3 крупного рогатого скота в одном из старейших племенных заводов Архангельской области АО «Холмогорский племзавод» (с. Холмогоры).

Исследования проводили в лаборатории инновационных технологий в АПК на базе Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики имени академика Н. П. Лаверова Уральского отделения Российской академии наук (ФГБУН ФИЦКИА УРО РАН) в 2023 году. В работе анализировали образцы ДНК маточного поголовья голштинизированного крупного рогатого скота холмогорской породы (n = 195), доля кровности которых составляет до 70 %.

Биологический материал (кровь) для выделения ДНК отбирали из ярёмной вены в вакуумные пробирки с ЭДТА К3. Выделение ДНК проводили из цельной крови коров с помощью набора реагентов для экстракции ДНК/РНК из биологического материала животных и продуктов питания животного происхождения «МагноПрайм ВЕТ», производитель «НекстБио» (Россия).

Для определения аллелей А и В каппаказеина использовали метод ПЦР-ПДРФ (полимеразная цепная реакция полиморфизма длин рестрикционных фрагментов).

Для проведения ПЦР применяли специфичные праймеры производства ЗАО «Синтол»:
прямой праймер –
5’-ATAGCCAAATATATCCCAATTCAGT -3’;
обратный праймер –
5’-TTTATTAATAAGTCCATGAATCTTG -3’.

Амплификацию гена CSN3 проводили с праймерами на ДНК-амплификаторе Applied Biosystems MiniAmp Plus (США) в объеме 25 мкл с помощью набора для проведения ПЦР с HS-Taq (+$MgCl_2$) от «Биолабмикс» по следующей программе: горячий старт – 5 мин при 95 °С; последующие 40 циклов: денатурация – 30 с при 95 °С, отжиг – 45 с при 60 °С, синтез – 30 с при 72 °С; элонгация – 5 мин при 72 °С.

Для оценки полноты проведения ПЦР полученный продукт помещали в 2%-ный агарозный гель и проводили горизонтальный электрофорез в течение 40 минут при 100 В. Затем для окрашивания и визуализации фрагментов агарозный гель после электрофореза выдерживали в 0,005%-ном растворе бромистого этидия в течение 15 минут и просматривали в системе гель-документирования «Взгляд» с помощью трансиллюминатора «КвантМ-312Б» при длине волны 310 нм. Положительным результатом амплификации являлось наличие фрагментов ДНК длиной 530 пар нуклеотидов.

Полученные амплификаты подвергали рестрикции с помощью эндонуклеазы рестрикции Hind III «SibEnzyme» согласно рекомендациям производителя. После рестрикции фрагменты амплификатов разделяли с помощью горизонтального электрофореза в 3%-ном агарозном геле в течение 40 минут при 100 В, и детектировали результат в системе «Взгляд».

В зависимости от генотипа исследуемого животного по гену CSN3 образовывались фрагменты 530, 400 и 130 пар нуклеотидов. Генотипу АА соответствует наличие одного фрагмента длиной 530 пар нуклеотидов, для генотипа ВВ – наличие двух фрагментов длиной 400 и 130 пар нуклеотидов, для АВ – все три фрагмента 530, 400 и 130 пар нуклеотидов.

Частоту встречаемости генотипов рассчитывали согласно Е. К. Меркурьевой[1] по формуле:

$$P = \frac{n}{N}, \quad (1)$$

где P – частота определенного генотипа,
n – количество животных, имеющих определенный генотип, N – общее число животных.

Частоту отдельных аллелей определяли по формулам:

$$P^A = \frac{(2\,nAA + nAB)}{2N}, \quad (2)$$

$$Q^B = \frac{(2\,nBB + nAB)}{2N}, \quad (3)$$

где P^A – частота аллеля А, Q^B– частота аллеля В, nAA, nAB, nBB – количество животных с определенным генотипом, N – общее число животных.

Результаты и их обсуждение. Для определения полиморфизма гена CSN3 у маточного поголовья коров одного из ведущих племенных хозяйств по разведению холмогорской породы АО «Холмогорский Племзавод» в Архангельской области провели ДНК-тестирование 195 голов (табл. 1).

[1]Меркурьева Е. К., Шангин-Березовский Г. Н. Генетика с основами биометрии. Серия: Учебники и учебные пособия для высших сельскохозяйственных учебных заведений. М: Колос, 1983. 400 с.

Таблица 1 – **Полиморфизм локуса каппа-казеина у голштинизированных коров холмогорской породы /**
Table 1 – **Polymorphism of the kappa-casein locus in holsteinized Kholmogory cows**

Показатель / Index	*n*	*Частота встречаемости генотипов / Frequency of occurrence of genotypes*						*Частота встречаемости аллелей, % / Allele frequency, %*		χ^2
		AA		*AB*		*BB*		*A*	*B*	
		n	*%*	*n*	*%*	*n*	*%*			
Наблюдаемое распределение / Observed Distribution	195	123	63,08	65	33,33	7	3,59	79,74	20,26	0,197
Ожидаемое распределение / Expected Distribution		124	63,6	63	32,3	8	4,1			

Анализ полученных данных генотипирования показал, что аллель А гена каппа-казеина является доминирующей в исследуемой выборке коров и ее частота встречаемости равна 79,74 %, частота встречаемости аллеля В составила 20,26 %.

Частота встречаемости генотипов в данной выборке по гену k-казеина распределилась следующим образом: генотип АА составил 63,08 % (123 из 195 голов), реже встречался генотип АВ – 33,33 % (65 из 195) и наименьшая частота проявилась у генотипа ВВ – 3,59 % (7 из 195). Генетическое равновесие по закону Харди-Вайнберга сохранено, и наблюдаемая частота генотипов соответствует ожидаемой.

Для оценки молочной продуктивности и качества молока у коров холмогорской породы с разными генотипами CSN3 сравнили показатели продуктивности за последнюю законченную лактацию (удой, содержание и количество жира в молоке, содержание и количество белка в молоке за 305 дней) (табл. 2). Общее количество коров с законченной лактацией в исследуемой выборке составило 130 голов из них: 37 коров-первотелок, 6 – по второй лактации и 87 – по третьей лактации и старше.

Таким образом, в результате проведенного анализа было установлено, что у всех исследуемых коров преобладающим является гомозиготный генотип АА. Средний удой у 77 коров с генотипом АА составил 6793 кг, что на 382 кг молока больше, чем у животных с генотипом АВ и на 123 кг меньше, чем с генотипом ВВ. Массовая доля жира у животных с генотипом АА составила 4,04 %, что на 0,09 % больше, чем с генотипом АВ, но на 0,1 % меньше, чем у коров с генотипом ВВ. Массовая доля белка у коров с генотипом АА составила 3,09 %, что на 0,03 % меньше, чем с генотипом АВ и на 0,07 % меньше по сравнению с генотипом ВВ.

В связи с тем, что в исследуемой выборке преобладали коровы с третьей лактацией и старше, показатели молочной продуктивности были проанализированы в разрезе генотипов. Наивысшие показатели продуктивности выявлены у коров с генотипом ВВ каппа-казеина – удой составил 7163±308 кг, массовая доля жира – 4,19±0,24 % и белка – 3,11±0,04 %. В результате проведённых исследований было установлено положительное влияние генотипов ВВ и АВ на показатели массовой доли жира и белка в молоке коров изучаемого поголовья. Статистическая обработка полученных данных показала достоверную разницу между животными с генотипами АА и АВ по третьей лактации и старше по удою, количеству молочного жира и молочного белка.

Заключение. Результаты исследований показали разнообразие генетических вариантов гена каппа-казеина, оказывающего влияние на хозяйственно ценные признаки молочной продуктивности коров холмогорской породы, разводимой в условиях Европейского Севера России. Однако оценивать это влияние следует для каждого стада отдельно с учётом единообразия технологии содержания и кормления животных. Генотип ВВ каппа-казеина в данной выборке показал себя как наиболее ценный для проведения отбора при формировании стад высокопродуктивных животных. В настоящий момент носителей данного генотипа в стаде АО «Холмогорский племзавод» мало, как следствие необходимо вести отбор коров для увеличения численности животных с генотипом ВВ. Рекомендуется проводить молекулярно-генетическое тестирование популяции холмогорской породы крупного рогатого скота по изучаемому гену для выявления и накопления генотипов животных, способствующих повышению качественных и количественных показателей молока.

Таблица 2 – **Характеристика молочной продуктивности голштинизированных коров холмогорской породы с разными генотипами каппа-казеина (за 305 дней последней законченной лактации) /**

Table 2 – **Characteristics of milk productivity of holsteinized cows of the Kholmogory breed with different kappa-casein genotypes (for 305 days of the last completed lactation)**

Показатель / Index	*Генотип / Genotype*											
	1 лактация (n = 37) / 1 lactation (n = 37)			*2 лактация (n = 6) / 2 lactation (n = 6)*			*3 и более лактации (n = 87) / 3 or more lactations (n = 87)*			*Итого (n = 130) / Total (n = 130)*		
	AA (n = 16)	*AB (n = 19)*	*BB (n = 2)*	*AA (n = 5)*	*AB (n = 1)*	*BB (n = 0)*	*AA (n = 56)*	*AB (n = 28)*	*BB (n = 3)*	*AA (n = 77)*	*AB (n = 48)*	*BB (n = 5)*
Удой за 305 дней лактации, кг / Milk yield for 305 days of lactation, kg	5606±280	6102±288	6545±380	7032±430*	5687±0	0	7110±147*	6646±166	7163±309	6793±143	6411±155	6916±275
Массовая доля жира, % / Mass fraction of fat, %	3,89±0,14	3,94±0,10	4,05±0,40	4,10±0,15	4,07±0	0	4,06±0,08	3,96±0,11	4,19±0,24	4,04±0,06	3,95±0,08	4,14±0,22
Количество молочного жира, кг / The amount of milk fat, kg	218±14	240±15	265±42	288±27	231±0	0	289±8*	263±8	300±7**	274±7	253±8	286±19
Массовая доля белка, % / Mass fraction of protein, %	3,18±0,05	3,22±0,04	3,24±0,15	3,07±0,06*	3,46±0	0	3,07±0,03	3,05±0,03	3,11±0,04	3,09±0,02	3,12±0,03	3,16±0,07
Количество молочного белка, кг / The amount of milk protein, kg	178±9	197±10	212±22	216±14	197±0	0	218±5*	202±5	223±12	210±5	200±5	219±12

Примечание: Различия достоверны по отношению к животным с аналогичной лактацией с генотипом АВ при *p≤0,05, **p≤0,01 /
Note: The differences are significant in relation to animals with similar lactation with the AB genotype at *p<0.05, **p<0.01

References

1. Alipanah M., Kalashnikova L. A., Rodionov G. V. Kappa-casein and PRL-Rsa I genotypic frequencies in two Russian cattle breeds. Archivos de zootecnia. 2008;57(218):131–138. URL: https://www.researchgate.net/publication/28317609_Kappa-casein_and_PRL-RSAI_genotypic_frequencies_in_two_Russian_cattle_breeds

2. Botaro B. G., Lima Y., Cortinhas C. S., Silva L. F. P. Effect of the kappa-casein gene polymorphism, breed and seasonality on physicochemical characteristics, composition and stability of bovine milk. Revista Brasileira de Zootecnia. 2009;38(12):2447–2454. DOI: https://doi.org/10.1590/S1516-35982009001200022

3. Bankar P. S., Kuralkar S., Dhore R., Manwar S., Ingawale M., Sajid Ali S. Impact of kappa casein gene polymorphism on milk components of Gaolao cattle. International Journal of Science, Environment and Technology. 2018;7(5):1520–1527. URL: https://www.researchgate.net/publication/328028124_IMPACT_OF_KAPPA_CASEIN_GENE_POLYMORPHISM_ON_MILK_COMPONENTS_OF_GAOLAO_CATTLE

4. Čítek J., Hanusová L., Lískovcováv L., Samková E., Hanuš O., Hasoňová L., Křižová Z., Večerek L. Polymorphisms in CSN3, CSN2 and LGB genes and their relation to milk production in dairy cattle in the Czech Republic. Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis. 2019;67(1):19–24. DOI: https://doi.org/10.11118/actaun201967010019

5. Djedović R., Bogdanović V., Perišić P., Stanojević D., Popović J., Brka M. Relationship between genetic polymorphism of k-casein and quantitative milk yield traits in cattle breeds and crossbreds in Serbia. Genetika. 2015;47(1):23–32. DOI: https://doi.org/10.2298/GENSR1501023D

6. Neamt R., Saplacan G., Acatincai S., Cziszter L. T., Gavojdian D., Ilie D. E. The influence of CSN3 and LGB polymorphisms on milk production and chemical composition in Romanian Simmental cattle. Acta Biochimica Polonica. 2017;64(3):493–497. DOI: https://doi.org/10.18388/abp.2016_1454

7. Awad A., El Araby I. E., El-Bayomi Kh. M., Zaglool A. W. Association of polymorphisms in kappa casein gene with milk traits in Holstein Friesian cattle. Japanese Journal of Veterinary Research. 2016;64(2):S39–S43. URL: http://hdl.handle.net/2115/62028

8. Di Gregorio P., Di Grigoli A., Di Trana A., Alabiso M., Maniaci G., Rando A., Valluzzi G., Finizio D., Bonanno A. Effects of different genotypes at the CSN3 and LGB loci on milk and cheese-making characteristics of the bovine Cinisara breed. International Dairy Journal. 2017;71:1–5. DOI: https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2016.11.001

9. Крупин Е. О., Шакиров Ш. К., Тагиров М. Ш. Молочная продуктивность и качество молока коров в зависимости от генотипа. Дальневосточный аграрный вестник. 2017;(4(44)):120–125. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32541968 EDN: YQXNBJ

Krupin E. O., Shakirov Sh. K., Tagirov M. Sh. Dairy productivity and quality of cow milk depending on genotype. *Dal'nevostochnyy agrarnyy vestnik* = Far Eastern Agrarian Herald. 2017;(4(44)):120–125. (In Russ.). URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32541968

10. Тюлькин С. В. Влияние генотипа коров на их продуктивность и качество молока. Пищевые системы. 2018;1(3):38–43. DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2018-1-3-38-43 EDN: YBSZML

Tyulkin S. V. The effect of cows genotype on their productivity and milk quality. *Pishchevye sistemy* = Food systems. 2018;1(3):38–43. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2018-1-3-38-43

11. Шайдуллин Р. Р. Физико-химические показатели молока коров-первотёлок с разными генотипами по генам CSN3 и DGAT1. Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. 2018;(2):140–144. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35424032 EDN: XWDVID

Shaydullin R. R. Physical and chemical parameters of milk of first-calf cows with different genotypes by CSN3 and DGAT1 genes. *Vestnik Michurinskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2018;(2):140–144. (In Russ.). URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35424032

12. Heck J. M. L., Bovenhuis H., Schennink A., Van Valenberg H. J. F., Visker M. H. P. W. Effects of milk protein variants on the protein composition of bovine milk. Journal of dairy science. 2009;92(3):1192–1202. DOI: https://doi.org/10.3168/jds.2008-1208

13. Mahmoudi P., Rostamzadeh J., Rashidi A., Zergani E., Razmkabir M. A meta-analysis on association between CSN3 gene variants and milk yield and composition in cattle. Animal genetics. 2020;51(3):369–381. DOI: https://doi.org/10.1111/age.12922

14. Molee A., Mernkrathoke P., Poompramun C. Effect of casein genes-beta-LGB, DGAT1, GH, and LHR-on milk production and milk composition traits in crossbred Holsteins. Genetics and Molecular Research. 2015;14(1):2561–2571. DOI: https://doi.org/10.4238/2015.March.30.15

15. Anggraeni A., Andreas E., Sumantri C., Anneke A., Nury H. S. Genetic variants of k-Casein and β-Lactoglobulin genes and their association with protein and milk components of Holstein Friesian cows at small farmers in Lembang, West Java. KnE Life Sciences. 2017;2(6):86–94. DOI: https://doi.org/10.18502/kls.v2i6.1023

16. Bartonova P., Vrtková I., Kaplanová K., Urban T. Association between CSN3 and BCO2 gene polymorphisms and milk performance traits in the Czech Fleckvieh cattle breed. Genetics and Molecular Research. 2012;11(2):1058–1063. DOI: https://doi.org/10.4238/2012.April.27.4

17. Bugeac T., Balteanu V. A., Creanga S. Kappa-casein genetic variants and their relationships with milk production and quality in Montbéliarde dairy cows. Conference: The 12th International Symposium «Prospects for the Third Millennium Agriculture». At: Cluj-Napoca County, Romania, 2013. pp. 193–194. URL: https://www.researchgate.net/publication/274083438_Kappa-Casein_Genetic_Variants_and_their_Relationships_with_Milk_Production_and_Quality_in_Montbeliarde_Dairy_Cows

Сведения об авторах

Худякова Наталья Александровна, кандидат с.-х. наук, научный сотрудник, ФГБУН Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н. П. Лаверова Уральского отделения Российской академии наук, пр. Никольский, д. 20, г. Архангельск, Российская Федерация, 163020, e-mail: dirnauka@fciarctic.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1302-2965**

Кожевникова Ирина Сергеевна, кандидат биол. наук, заведующая лабораторией, ФГБУН Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н. П. Лаверова Уральского отделения Российской академии наук, пр. Никольский, д.20, г. Архангельск, Российская Федерация, 163020, e-mail: dirnauka@fciarctic.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7194-9465**

Щипакова Екатерина Николаевна, младший научный сотрудник, ФГБУН Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н. П. Лаверова Уральского отделения Российской академии наук, пр. Никольский, д. 20, г. Архангельск, Российская Федерация, 163020, e-mail: dirnauka@fciarctic.ru, **ORCID: https://orcid.org/0009-0007-6952-9665**

✉ **Кондакова Алёна Андреевна,** младший научный сотрудник, ФГБУН Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н. П. Лаверова Уральского отделения Российской академии наук, пр. Никольский, д. 20, г. Архангельск, Российская Федерация, 163020, e-mail: dirnauka@fciarctic.ru, **ORCID: https://orcid.org/0009-0002-5261-3557,** e-mail: labinnovrazv@yandex.ru

Калмыкова Мария Сергеевна, младший научный сотрудник, ФГБУН Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н. П. Лаверова Уральского отделения Российской академии наук, пр. Никольский, д.20, г. Архангельск, Российская Федерация, 163020, e-mail: dirnauka@fciarctic.ru, **ORCID: https://orcid.org/0009-0000-0404-4631**

Information about the authors

Natalia A. Khudyakova, PhD in Agricultural Science, researcher, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Nikolsky Ave., 20, Arkhangelsk, Russian Federation, 163020, e-mail: dirnauka@fciarctic.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1302-2965**

Irina S. Kozhevnikova, PhD in Biological Science, Head of the Laboratory, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Nikolsky Ave., 20, Arkhangelsk, Russian Federation, 163020, e-mail: dirnau-ka@fciarctic.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7194-9465**

Ekaterina N. Shchipakova, junior researcher, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Nikolsky Ave., 20, Arkhangelsk, Russian Federation, 163020, e-mail: dirnauka@fciarctic.ru, **ORCID: https://orcid.org/0009-0007-6952-9665**

✉ **Alena A. Kondakova**, junior researcher, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 20 Nikolsky Ave., Arkhangelsk, Russian Federation, 163020, e-mail: dirnauka@fciarctic.ru, **ORCID: https://orcid.org/0009-0002-5261-3557,** e-mail: labinnovrazv@yandex.ru

Maria S. Kalmykova, junior researcher, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Nikolsky Ave., 20, Arkhangelsk, Russian Federation, 163020, e-mail: dirnauka@fciarctic.ru, **ORCID: https://orcid.org/0009-0000-0404-4631**

✉ – Для контактов / Corresponding author

https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.1.82-89
УДК 636.2:636.082.2

Взаимосвязь между оценкой племенной ценности быков-производителей палево-пестрой популяции скота на разном уровне управления селекцией

© 2024. Н. С. Алтухова[1] ✉, И. Н. Янчуков[2], А. В. Савинов[1], Ю. А. Иванов[3]
[1]*ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К. А. Тимирязева», г. Москва, Российская Федерация,*
[2]*АО «Московское» по племенной работе», г. Ногинск, Московская обл., Российская Федерация,*
[3]*ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», г. Москва, Российская Федерация*

Репродуктивные технологии привели к широкому и глобальному распространению генетического материала животных с высоким производственным потенциалом. Однако распространение (продажа) спермы одних и тех же быков-производителей в разные регионы (страны) не всегда может оправдать ожиданий животноводов. Этот аспект может быть связан с тем, что генетическая структура маточного поголовья, на которой используются быки, цели селекции и условия окружающей среды в разных регионах неодинаковы. В статье представлены результаты оценки племенной ценности 286 быков-производителей, которые использовались на маточном поголовье палево-пестрой популяции крупного рогатого скота в пяти регионах РФ (Белгородская, Воронежская, Курская, Орловская области и Алтайский край). Оценка была проведена как по отдельным признакам молочной продуктивности дочерей, так и совокупности признаков (селекционному индексу). Результаты исследования показали различия в величинах оценок племенной ценности одних и тех же производителей на уровне объединённой информации (популяционный уровень) и в стадах отдельных регионов (региональный уровень). Точность оценки генотипов на популяционном уровне управления получена выше (на 7–15 %), чем в среднем по отдельным регионам. Корреляции, рассчитанные между индексами племенной ценности одних и тех же быков на разных уровнях управления (популяция-регион), по отдельным признакам молочной продуктивности потомства установились на уровне 0,522–0,960, по комплексу признаков (селекционному индексу) – от 0,157 до 0,937. Это указывает на то, что вероятность ошибки при выборе лучших производителей на уровне отдельного региона может достигать 4–48 % по отдельным признакам молочной продуктивности и от 6,3 до 84.0 % по их комплексу.

Ключевые слова: *крупный рогатый скот, селекционные группы, признаки молочной продуктивности, BLUP-методология, селекционный индекс, ранговая корреляция*

***Благодарности*:** работа выполнена без финансового обеспечения в рамках инициативной тематики.
Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Алтухова Н. С., Янчуков И. Н., Савинов А. В., Иванов Ю. А. Взаимосвязь между оценкой племенной ценности быков-производителей палево-пестрой популяции скота на разном уровне управления селекцией. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2024;25(1):82–89. DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.1.82-89

Поступила: 23.12.2023 Принята к публикации: 01.02.2024 Опубликована онлайн: 28.02.2024

Relationship between evaluations of sires in pale-motley cattle population at different levels of management

© 2024. Natalia S. Altukhova[1] ✉, Ivan N. Yanchukov[2], Anton V. Savinov[2], Yuri A. Ivanov[3]
[1]*Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation,*
[2]*JSC «Moscovskoye» Breeding Farm», Noginsk, Moscow region, Russian Federation,*
[3]*Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation*

Reproductive technologies have led to a wide and global distribution of genetic material from animals with high productivity. However, the distribution of semen from the same bulls to different regions (countries) may not always meet the expectations of livestock breeders. This aspect may be due to the fact that the genetic structure of the breeding stock, breeding goals and environmental conditions vary from region to region. The article presents the results of evaluating the breeding value of 286 sires used on the breeding stock of the pale-motley dairy cattle population in five regions of the Russian Federation (Belgorod, Voronezh, Kursk, Oryol regions and Altai Territory). The evaluation was carried out according to individual traits of daughters' milk productivity, and on multiple traits (selection index). Based on the results of the study, differences were identified in estimates of the breeding value of the same sires at the level of total information (population level) and in the herds of single regions (regional level). The accuracy of evaluating genotypes at the population management level was signif-

icantly higher (by 7–15 percent) than it was at regional levels. The correlations between the breeding value of the same sires at different levels of management (population-region) for single traits of daughter's milk productivity were 0.522–0.960, for the complex of traits (selection index) – from 0.157 to 0.937. This indicates that when selecting the best sires at the level of an individual region, mistakes can reach 4–48 % for single milk productivity traits and from 6.3 to 84 % for their complex.

Keywords: *dairy cattle, selection groups, milk productivity traits, BLUP-methodology, selection index, rank correlation*

Acknowledgements: the work was completed without financial support within the framework of the initiative topic. The authors thank the reviewers for their contribution to the expert evaluation of this work.

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

For citations: Altukhova N. S., Yanchukov I. N., Savinov A. V., Ivanov Yu. A. Relationship between evaluations of sires in pale-motley cattle population at different levels of management. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2024;25(1):82–89. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.1.82-89

Received: 23.12.2023 Accepted for publication: 01.02.2024 Published online: 28.02.2024

Увеличению темпов генетического прогресса в популяциях молочного скота по основным селекционным признакам способствуют многие факторы различной природы, среди которых ключевое место занимает племенная работа, нацеленная на выявление высокоценных генотипов и максимальное их использование.

Генетическое совершенствовании стад, пород и популяций сельскохозяйственных животных осуществляется на основе оценки племенных качеств мужских и женских особей, их отбора в селекционные группы и последующего спаривания. Оценку быков можно определить как процесс отбора племенных быков в качестве будущих производителей для генетического улучшения массивов животных определенных пород(ы) на основе показателей их потомства и информации их родственников [1, 2]. Оценка быков-производителей по их способности передавать генетическую информацию о развитии селекционных признаков своим дочерям приобрела большое значение, поскольку в отношении самцов может применяться высокая интенсивность отбора [3, 4]. Бóльший вклад производителей в генетическое совершенствование селекционных признаков также можно объяснить с точки зрения бóльшего количества воспроизводимого потомства, которое быки могут оставить после себя. Оценка быка более значима еще и потому, что при использовании искусственного осеменения можно распространить значительное количество элитного племенного материала, а разработка и внедрение в последние годы в практику животноводства геномной селекции позволяет проводить ранний отбор среди молодых самцов [5]. Все эти аспекты обеспечивают экономию средств и времени.

Увеличение темпов генетического прогресса в породах и популяциях зависит от точности выбора быков, интенсивности их отбора, интервала между поколениями и генетической изменчивости рассматриваемых признаков [6].

Оценка племенной ценности производителей является важной частью при разработке селекционных программ на долгосрочную перспективу. Программа будет более эффективной, если научно-методологические подходы в системе учета и оценки генетических качеств особей будут максимально точными и надежными для прогнозов эффективности разведения быков [7].

В отличие от США, Канады и ряда европейских стран с развитым племенным животноводством, в России отсутствуют интенсивные программы тестирования производителей, которые позволяют обеспечить популяцию скота той или иной породы высокоценными быками-производителями. Мировой рынок молочного скотоводства, позволяющий сравнивать оценки быков в разных странах, способствовал созданию в 1983 году организации INTERBULL, которая координирует оценку племенной ценности в странах-участницах и обеспечивает конвертацию генетической ценности животных по всему миру [8].

Оценка племенной ценности животных по селекционным признакам в молочном скотоводстве Российской Федерации возложена на региональные информационно-селекционные центры (РИСЦ) [9]. Однако до сих пор в правовом поле не определена организация, ответственная за одновременную оценку животных по совокупности регионов. Необходимость в совокупной оценке связана с тем, что прямое сравнение генетических качеств одних и тех же животных, используемых в разных регионах, невозможно по нескольким причинам: а) признаки, представляющие интерес в одном регионе, могут не оцениваться в других; б) возможно взаимодействие генотипа и среды.

Оценка производителей на уровне породы (популяции) также позволила бы исключить дублирование региональных оценок у одних и тех же производителей [10].

Актуальность исследований состоит в построении научно обоснованной системы управления племенной работой с молочным скотом (на примере палево-пестрой популяции крупного рогатого скота пяти регионов РФ).

Цель исследований – сравнение оценки племенной ценности производителей по признакам молочной продуктивности дочерей на основе установления/выявления взаимосвязи между быками на разных уровнях управления племенными ресурсами.

Научная новизна – для быков-производителей популяции палево-пестрого скота разработаны структуры селекционных индексов на региональных и федеральном уровнях управления, проведена сравнительная оценка эффективности использования одних и тех же быков-производителей палево-пестрой популяции скота на региональных и популяционном уровнях.

Материал и методы. В качестве материала исследования послужили данные о молочной продуктивности коров-первотёлок, которые являлись дочерями быков симментальской и красно-пестрой пород, объединенных в палево-пеструю популяцию крупного рогатого скота. Всего в обработку были включены 72240 записей дочерей из пяти регионов Российской Федерации: Белгородская, Воронежская, Курская, Орловская области и Алтайский край. Все быки были оценены отдельно по каждой области и совокупности областей. Прогноз племенной ценности быков рассчитывали по пяти признакам молочной продуктивности (удой за 305 дней лактации, кг, массовая доля жира, %, количество молочного жира, кг, массовая доля белка, %, количество молочного белка, кг) на основе ранее разработанного и оптимизированного нами уравнения BLUP (наилучший линейный несмещенный прогноз) [11]:

$$y = \mu + HYS + b_1A_k + S_j + e_{ijk},$$

где y – вектор показателей продуктивности дочерей; μ – популяционная константа; HYS – эффект паратипических факторов «стадо-год-сезон» (фиксированный); b_1 – коэффициент линейной регрессии показателя продуктивности на возраст дочерей; A_k – возраст отела (в месяцах); S_j – рандомизированный эффект «отец-производитель»; e_{ijk} – рандомизированный остаточный эффект модели.

В расчете оценки племенной ценности использовались только быки, индексы племенной ценности (ИПЦ) которых имели точность оценки (reliability) не менее 60 % [12]. Расчет был проведён в региональном информационно-селекционном центре «Мосплеминформ» (АО «Московское» по племенной работе) на основе разработанных нами алгоритмов.

Комплексную оценку производителей определяли на основе методических положений теории построения селекционного индекса [13] применительно к решаемым селекционным задачам. За основу использовали уравнение селекционного индекса вида:

$$I = b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_4 + b_5X_5,$$

где I – индекс племенной ценности по комплексу показателей продуктивности; $b_{1\text{-}5}$ – весовые коэффициенты для каждого признака молочной продуктивности; $X_{1\text{-}5}$ – результаты оценки племенной ценности производителей по отдельным показателям молочной продуктивности дочерей. Расчет весовых коэффициентов уравнений селекционного индекса осуществляли на основе ранее рассчитанных нами селекционно-генетических параметров признаков [11].

Экономические составляющие весовых коэффициентов в уравнении селекционного индекса были определены следующими: $b_1 = 1$; $b_2 = 3$; $b_3 = 20$; $b_4 = 4$; $b_5 = 60$. Все расчеты проводили в разрезе регионов и на уровне управления популяцией (по совокупности регионов).

Результаты и их обсуждение. Результаты прогноза племенной ценности быков-производителей по показателям продуктивности дочерей в исследуемых областях и по их совокупности приведены в таблице 1.

За исследуемый период наиболее широко племенной материал быков использовался на маточном поголовье в стадах Белгородской (98,2 %) и Воронежской областях (97,9 %). Среднее число дочерей на одного производителя колебалось от 38,5 гол. (Курская обл.) до 158,4 гол. (Воронежская обл.).

Точность оценки племенных качеств быков по информации о продуктивности дочерей в рамках всей популяции оказалась выше, чем соответствующий критерий их прогнозов в отдельных регионах. В наших исследованиях средняя точность оценки быков по качеству потомства в целом по популяции составила 0,881, в то время как в отдельных регионах этот показатель варьировал от 0,728 (Курская обл.) до 0,826 (Воронежская обл.).

Таблица 1 – **Оценка быков-производителей методом BLUP на разных уровнях управления /**
Table 1 – **Evaluation of sires by BLUP method at different management levels**

Показатель / Trait		*Уровень управления / Level of management*					
		По совокупности регионов / Regional average	*Белгородская область / Belgorod Region*	*Воронежская область / Voronezh Region*	*Курская область / Kursk Region*	*Орловская область / Orlov Region*	*Алтайский край / Altai Territory*
Среднее / Average	Число оцененных быков, гол. / No. of tested bulls, heads	286	281	280	54	53	74
	Число дочерей, гол. / No. of daughters, heads	567,7	53,5	158,4	38,5	75,6	68,9
	Число эффектов "стадо-год-сезон" / No. of effects «Heard-Year-Season»	18,2	7,9	15,7	7,4	10,8	7,2
	Число эффективных дочерей, гол. / No.of effective daughters, heads	121,4	39,7	92,1	26,2	54,8	49,1
	Надежность оценки / Reliability	0,881	0,766	0,826	0,728	0,808	0,767
Средний индекс племенной ценности (ИПЦ) быков / Average indices of bull's breeding value	Удой, кг / Yield, kg	-0,6	+8,2	-1,5	-2,0	-50,4	-14,4
	МДЖ, % / Fat, %	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	КМЖ, кг / Fat, kg	+0,2	+0,3	-0,05	-0,2	-1,9	-0,8
	МДБ, % / Protein, %	0,00	0,00	0,00	-0,01	0,00	-0,01
	КМБ, кг / Protein, kg	-0,2	+0,1	-0,05	-2,4	-1,1	-1,0

Средние индексы племенной ценности производителей по отдельным признакам молочной продуктивности дочерей на разных уровнях управления имели неоднозначные результаты. Наибольшими средними величинами генетической ценности по удою характеризовались только быки, использовавшиеся в Белгородской области (+8,2 кг, с вариацией от -2096 кг до +1953 кг). Как на уровне популяции, так и региональных субпопуляциях индексы племенной ценности (ИПЦ) животных по содержанию жира и содержанию белка в молоке фактически мало различались между собой и имели значения, равные или близкие к нулю. Величины ИПЦ быков по количеству молочного жира и количеству молочного белка на уровне регионов были отрицательными, за исключением Белгородской области (+0,3 и +0,1 кг соответственно), что указывает на отсутствие ведения эффективной племенной работы с животными палево-пестрой популяции в регионах и желательного генетического прогресса по селекционным признакам молочной продуктивности.

При генетическом совершенствовании популяций животных в современных селекционных программах разных пород и видов сельскохозяйственных животных предусматривается улучшение не одного, а комплекса хозяйственных признаков [14]. Величины племенной ценности различных признаков объединяются в общий индекс (селекционный индекс), отражающий цель разведения соответствующей племенной программы, и предполагается, что этот общий показатель является основным критерием отбора [15]. В этой связи нами были разработаны структуры уравнений селекционных индексов для оценки быков по совокупности признаков молочной продуктивности дочерей на разных уровнях управления (табл. 2).

Как видно из данных таблицы, весовые коэффициенты признаков, включенных в структуры индексов, указывают на практически равную значимость удоя во всех уравнениях. Наибольшие величины весовых коэффициентов в структурах всех индексов имеют качественные компоненты молока – содержание жира (X_2) и содержание белка в молоке (X_4). Это можно объяснить низкой их вариабельностью у особей в популяции. Аналогичные величины были получены нами ранее у животных симментальской породы в тех же регионах [6].

На основе моделей BLUP и сконструированных селекционных индексов были рассчитаны величины индексов племенной ценности у одних и тех же быков-производителей по отдельным признакам продуктивности дочерей и их совокупности на разных уровнях управления (табл. 3).

Таблица 2 – **Структуры уравнений селекционного индекса для оценки быков-производителей палево-пестрой популяции (транспонированные к 100-балльной шкале) /**
Table2 – **Structures of selection index equations for evaluating sires in pale-motley population (transposed to a 100-point scale)**

Уровень управления / Level of management	*Структура уравнения селекционного индекса / Structure of selection index equation*
По совокупности регионов / Regional average	$I_{общий} = (-0,02)X_1 + 88,38X_2 + 2,45X_3 + 8,88X_4 + 0,28X_5$
Белгородская область / Belgorod Region	$I_Б = 0,02X_1 + 48,22\ X_2 + 0,09X_3 + (-51,61)X_4 + (-0,06)X_5$
Воронежская область / Voronezh Region	$I_В = 0,01X_1 + 82,21\ X_2 + 0,24X_3 + 17,42X_4 + 0,11X_5$
Курская область / Kursk Region	$I_К = 0,06X_1 + 65,44\ X_2 + (-1,15)X_3 + 35,43X_4 + (-0,22)X_5$
Орловская область / Oryol Region	$I_О = 0,00X_1 + 24,46\ X_2 + 0,02X_3 + 75,51X_4 + (-0,01)X_5$
Алтайский край / Altai Territory	$I_А = 0,02X_1 + 27,42\ X_2 + 0,00X_3 + 72,46X_4 + (-0,10)X_5$

Примечание:X_1 – удой, X_2 – содержание жира, %, X_3 – количество молочного жира, кг, X_4 – содержание белка, %, X_5 – количество молочного белка, кг / Note: X_1 – milk yield, X_2 – fat, %, X_3– fat, kg, X_4 – protein, %, X_5 – protein, kg

Таблица 3 – **Оценка быков-производителей палево-пестрой популяции по отдельным признакам продуктивности дочерей и их комплексу на разных уровнях управления /**
Table 3 – **Evaluation of stud bulls of the** Pale-motley dairy cattle **based on individual traits of daughters' productivity and their complex at different levels of management /**

Показатель / Trait					
Удой, кг / Yield, kg	*МДЖ, % / Fat, %*	*КМЖ, кг / Fat, kg*	*МДБ, % / Protein, %*	*КМБ, кг / Protein, kg*	*Селекционный индекс / Selection index*
Белгородская область / Belgorod Region (78) *					
+55,2 -1817…+1483	**+0,01** -0,17…+0,17	**+3,1** -72,0…+59,4	**0,00** -0,11…+0,06	**+2,0** -62,4…+47,1	**+4,51** -87,05…+70,85
-7,5 -1962…+1519	**+0,01** -0,3…+0,19	**+0,02** -78,3…+58,6	**0,00** -0,1…+0,11	**-0,62** -67,8…+47,5	**+0,08** -49,7…+40,4
Воронежская область / Voronezh Region (152)					
+4,5 -1422…+1325	**0,00** -0,52…+0,18	**+0,1** -69,2…+58,6	**-0,01** -0,20…+0,11	**-0,4** -42,6…+43,4	**-0,5** -88,8…+74,5
-20,0 -861…+1300	**-0,01** -0,46…+0,23	**-1,1** -33,5…+58,9	**0,00** -0,11…+0,10	**-0,8** -24,9…+42,8	**-1,1** -51,8…+43,1
Курская область / Kursk Region (23)					
-210,8 -1422…+1114	**+0,01** -0,31…+0,16	**-8,9** -69,2…+41,8	**0,00** -0,15…+0,06	**-7,2** -44,7…+33,3	**-10,0** -99,7…+44,4
-205,2 -1456…+1084	**-0,03** -0,30…+0,21	**-10,6** -66,3…+41,0	**-0,01** -0,16…+0,05	**-15,4** -107,3…+57,2	**+0,6** -9,3…+9,6
Алтайский край / Altai Territory (33)					
+130,5 -1362…+1022	**+0,06** -0,31…+0,23	**+7,8** -69,7…+40,6	**+0,01** -0,14…+0,06	**+4,1** -39,3…+34,0	**+13,0** -97,8…+58,3
+8,9 -1546…+901	**+0,04** -0,38…+0,38	**+2,2** -80,3…+41,6	**0,00** -0,18…+0,09	**+0,1** -44,8…+28,5	**+1,4** -34,0…+15,8
Орловская область / Oryol Region (23)					
+32,0 -613…+776,0	**0,00** -0,10…+0,09	**+1,3** -23,1…+32,6	**0,00** -0,11…+0,16	**+1,2** -22,7…+25,1	**+1,4** -27,1…+44,3
-99,0 -616…+334	**0,00** -0,11…0,00	**-3,6** -24,4…+14,6	**-0,01** -0,10…+0,20	**-2,9** -23,4…+12,1	**-0,6** -7,3…+9,3

* В скобках указано число совпадений одних и тех же быков /
*The total number of the same sires is in brackets

Из всей совокупности производителей палево-пестрой популяции, племенной материал которых использовался в пяти регионах, наибольшее число совпадений по быкам наблюдали в Воронежской области (53,1 %), наименьшее – в Курской и Орловской областях (по 8,0 %). Обращает на себя внимание, что средние индексы племенной ценности по отдельным признакам молочной продуктивности дочерей у одних и тех же быков, оцененных на уровне популяции, имели значения выше, чем в отдельных регионах, за исключением Курской области. Аналогичную картину наблюдали в отношении значений оценки быков по селекционному индексу. Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод о целесообразности/эффективности проведения отбора и формирования селекционных групп животных не в рамках отдельных регионов, а на уровне всей популяции (объединённой информации).

Как уже упоминалось выше, существование взаимодействия между генотипом животных и окружающей средой указывает на то, что разные генотипы проявляют различные реакции признаков в разных условиях. Очевидно, что это взаимодействие подразумевает изменение рангов генотипов в разных условиях. Физиологические предпосылки могут заключаться в том, что различные гены «включаются» и «выключаются» при изменении среды [16]. Подтверждением того, что одни и те же производители неодинаково проявляют себя на разных уровнях производства могут также служить и различия в принципах реализации продукции в отдельных регионах, которые вносят существенные коррективы в цели селекции, смещая ее направление [17].

В подтверждение вышесказанному в рамках исследуемых областей были рассмотрены корреляционные зависимости индексов быков по отдельным признакам молочной продуктивности дочерей и их комплексу (табл. 4).

Таблица 4 – **Коэффициенты ранговой корреляции между оценками одних и тех же быков-производителей по отдельным признакам продуктивности потомства и селекционному индексу на популяционном уровне и отдельными регионами /**
Table 4 – **Rank correlation coefficients between evaluations of breeding values of the same sires by single traits of milk productivity and by selection index on population level and among regions**

Уровень управления / Level of management	*Количество совпадений, гол. / No. of the same bulls, heads*	*Удой, кг / Yield, kg*	*МДЖ, % / Fat, %*	*КМЖ, кг / Fat, kg*	*МДБ, % / Protein, %*	*КМБ, кг / Protein, kg*	*Селекционный индекс / Selection index*
Белгородская область / Belgorod Region	78	+0,958	+0,868	+0,957	+0,877	+0,960	+0,937
Воронежская область / Voronezh Region	152	+0,911	+0,873	+0,918	+0,765	+0,950	+0,920
Курская область / Kursk Region	23	+0,685	+0,729	+0,648	+0,660	+0,711	+0,156
Алтайский край / Altai Territory	33	+0,811	+0,825	+0,819	+0,760	+0,787	+0,723
Орловская область / Oryol Region	23	+0,816	+0,522	+0,781	+0,639	+0,860	+0,484

Источник: Расчёты авторов / Source: Compiled by the authors

Результаты анализа свидетельствуют, что величины коэффициентов ранговой корреляции ИПЦ одних и тех же быков, оцененных по совокупной популяции и в отдельных регионах, существенно варьируют по отдельным признакам продуктивности: от +0,522 (МДЖ, %, Орловская обл.) до +0,960 (КМБ, кг, Белгородская обл.); по комплексу признаков – от +0,156 (Курская обл.) до +0,937 (Белгородская обл.). Следовательно, значения ИПЦ быков, рассчитанные по отдельным регионам, далеко не всегда соответствуют величинам индексов тех же быков, но полученных по совокупности регионов (популяционный уровень). Таким образом, для увеличения уровня генетического прогресса при совершенствовании массивов племенных животных палево-пестрой популяции скота целесообразно проводить оценку быков и в дальнейшем формировать селекционные группы животных на основе совокупной (объединённой) информации.

Выводы. 1. Средние индексы племенной ценности производителей палево-пестрой популяции скота, рассчитанные по отдельным признакам молочной продуктивности дочерей в отдельных регионах и их совокупности, имели

в основном отрицательные величины, а по качественным компонентам молока (процентное содержание жира и белка) – определились на уровне почти нулевого значения.

2. Организация оценки племенной ценности производителей на уровне популяции (совокупности регионов) позволяет более точно оценить генотипы животных (rel ≥ 0,881).

3. Комплектование быков-производителей в селекционные группы на основе их ранжирования по племенной ценности отдельных признаков молочной продуктивности дочерей ведет к выбору кандидатов, использование которых будет приводить к замедлению генетического прогресса по селекционным признакам в популяциях животных палево-пестрого скота.

4. Выявленная вариация в значениях ранговой корреляции племенной ценности быков-производителей по отдельным признакам молочной продуктивности потомства (+0,522…+0,960), а также по селекционному индексу (+0,156…+0,937) в отдельных регионах и их совокупности обусловливает необходимость организации оценки племенных качеств быков на уровне объединенной информации регионов, что позволит в масштабе выявить наиболее ценные генотипы и максимально использовать их в племенной работе.

Список литературы

1. Henderson C. R. Best linear unbiased estimation and prediction under a selection model. Biometrics 1975;31(2):423–447. URL: http://www.jstor.org/stable/2529430

2. Абрамова Н. И., Хромова О. Л., Зенкова Н. В., Селимян М. О. Направление селекционного процесса в стаде коров айрширской породы в условиях Вологодской области. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2023;24(3):448–458. DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.3.448-458 EDN: XKVOUC

3. Smith C., Banos G. Selection within and across populations in livestock improvement. Journal of Animal Science. 1991;69(6):2387–2394. DOI: https://doi.org/10.2527/1991.6962387x

4. Goddard M. G., Smith C. Optimum Number of Bull Sires in Dairy Cattle Breeding. Journal of Dairy Science. 1990;73:1113–1122. URL: https://www.journalofdairyscience.org/article/S0022-0302(90)78771-1/pdf

5. Weller J. I. Dargie J. D. Marker-assisted selection in dairy cattle. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO): FAO, 2007. pp.217–219.

6. Алтухова Н. С., Янчуков И. Н., Савинов А. В., Иванов Ю. А. Сравнительная оценка племенной ценности быков-производителей симментальской породы на породном и региональных уровнях управления. Научно-практическое обеспечение интенсивного развития животноводства и кормопроизводства на современном этапе: мат-лы Международ. научн.-практ. конф., посвящ. 90-летию со дня основания Казахского НИИ животноводства и кормопроизводства. Алматы: ТОО «Казахский НИИ животноводства и кормопроизводства», 2023. Т. 2. С. 84–91.

7. Statham J., Burton K., Spilman M. (2019). Looking after the bull: guide to management and assessment of fertility. In Practice. 2019;41(2):69–83. DOI: https://doi.org/10.1136/inp.l363

8. Kalm E. Development of cattle breeding strategies in Europe. Archiv fur Tierzucht. 2002;45(1):5–12. DOI: https://doi.org/10.5194/aab-45-5-2002

9. Мымрин С. В. Развитие племенного животноводства Российской Федерации: роль регионального информационно- селекционного центра в системе племенной работы. Аграрный вестник Урала. 2017;(2(156)):37–41. Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=29027537 EDN: YLFLLH

10. McDaniel B. T., Corley E. L. Relationships Between Sire Evaluations at Different Herdmate Levels. Journal of Dairy Science. 1967;50(5):735–741. DOI: https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(67)87503-9

11. Харитонов С. Н., Сермягин А. А., Игнатьева Л. П., Мельникова Е. Е., Алтухова Н. С., Ермилов А. Н., Янчуков И. Н. Методика оценки генетической ценности быков-производителей на региональном и федеральном уровнях управления племенными ресурсами. Дубровицы: ВНИИЖ имени академика Л. К. Эрнста, 2019. 78 с.

12. National genetic evaluation programmes for dairy production traits practised in interbull member countries 1999-2000. 2000;24.

13. Hazel L. N. The genetic basis for constructing selection indexes. Genetics. 1943;28(6):476–490. DOI: https://doi.org/10.1093/genetics/28.6.476

14. Phiupsson J., Banos G. Arnason T. Present and future uses of selection index methodology in dairy cattle. Journal of Dairy Science. 1994;77(10):3252–3261. URL: https://www.journalofdairyscience.org/article/S0022-0302(94)77266-0/pdf

15. Cole J. B., VanRaden P. M. Symposium review: Possibilities in an age of genomics: the future of selection indices. Journal of Dairy Science. 2018;101(4):3686–3701. DOI: https://doi.org/10.3168/jds.2017-13335

16. Yin T., König S. Heritabilities and genetic correlations in the same traits across different strata of herds created according to continuous genomic, genetic, and phenotypic descriptors. Journal of Dairy Science. 2018;101(3):2171–2186. DOI: https://doi.org/10.3168/jds.2017-13575

17. Мельникова Е. Е., Харитонов С. Н., Янчуков И. Н., Ионова Л. В., Ермилов А. Н., Сермягин А. А., Зиновьева Н. А. Селекционный индекс как экономическая составляющая основы племенной работы в молочном скотоводстве. Экономика сельскохозяйственных и перерабатывающих предприятий. 2018;(8):29–33. Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=35384793 EDN: XVLYYP

References

1. Henderson C. R. Best linear unbiased estimation and prediction under a selection model. Biometrics 1975;31(2):423–447. URL: http://www.jstor.org/stable/2529430

2. Abramova N. I., Khromova O. L., Zenkova N. V., Selimyan M. O. The direction of the breeding process in a herd of Ayrshire breed cows in the conditions of the Vologda region. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2023;24(3):448–458. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.3.448-458

3. Smith C., Banos G. Selection within and across populations in livestock improvement. Journal of Animal Science. 1991;69(6):2387–2394. DOI: https://doi.org/10.2527/1991.6962387x

4. Goddard M. G., Smith C. Optimum Number of Bull Sires in Dairy Cattle Breeding. Journal of Dairy Science. 1990;73:1113–1122. URL: https://www.journalofdairyscience.org/article/S0022-0302(90)78771-1/pdf

5. Weller J. I. Dargie J. D. Marker-assisted selection in dairy cattle. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO): FAO, 2007. pp. 217–219.

6. Altukhova N. S., Yanchukov I. N., Savinov A. V., Ivanov Yu. A. Comparison of breeding values of Simmental sires in various level of management. Scientific and practical support for the intensive development of animal husbandry and fodder production at the present stage: International scientific and practical conf., dedicated to the 90th anniversary of the founding of the Kazakh Research Institute of Animal Husbandry and Forage Production. Almaty: Almaty: *TOO «Kazakhskiy NII zhivotnovodstva i kormoproizvodstva»*, 2023. Vol. 2. pp. 84–91.

7. Statham J., Burton K., Spilman M. (2019). Looking after the bull: guide to management and assessment of fertility. In Practice. 2019;41(2):69–83. DOI: https://doi.org/10.1136/inp.l363

8. Kalm E. Development of cattle breeding strategies in Europe. Archiv fur Tierzucht. 2002;45(1):5–12. DOI: https://doi.org/10.5194/aab-45-5-2002

9. Mymrin S. V. Development of breeding livestock production of the Russian Federation the role role of the regional informational and selection center in the systemof breeding work. *Agrarnyy vestnik Urala* = Agrarian Bulletin of the Urals. 2017;(2(156)):37–41. (In Russ.). URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=29027537

10. McDaniel B. T., Corley E. L. Relationships Between Sire Evaluations at Different Herdmate Levels. Journal of Dairy Science. 1967;50(5):735–741. DOI: https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(67)87503-9

11. Kharitonov S. N., Sermyagin A. A., Ignateva L. P., Melnikova E. E., Altukhova N. S., Ermilov A. N., Yanchukov I. N. Methodology for evaluating the genetic value of sires at the regional and federal levels of management of genetic resources. Dubrovitsy: *VNIIZh imeni akademika L. K. Ernsta*, 2019. 78 p.

12. National genetic evaluation programmes for dairy production traits practised in interbull member countries 1999-2000. 2000;24.

13. Hazel L. N. The genetic basis for constructing selection indexes. Genetics. 1943;28(6):476–490. DOI: https://doi.org/10.1093/genetics/28.6.476

14. Phiupsson J., Banos G. Arnason T. Present and future uses of selection index methodology in dairy cattle. Journal of Dairy Science. 1994;77(10):3252–3261. URL: https://www.journalofdairyscience.org/article/S0022-0302(94)77266-0/pdf

15. Cole J. B., VanRaden P. M. Symposium review: Possibilities in an age of genomics: the future of selection indices. Journal of Dairy Science. 2018;101(4):3686–3701. DOI: https://doi.org/10.3168/jds.2017-13335

16. Yin T., König S. Heritabilities and genetic correlations in the same traits across different strata of herds created according to continuous genomic, genetic, and phenotypic descriptors. Journal of Dairy Science. 2018;101(3):2171–2186. DOI: https://doi.org/10.3168/jds.2017-13575

17. Melnikova E. E., Kharitonov S. N., Yanchukov I. N., Ionova L. V., Ermilov A. N., Sermyagin A. A., Zinovieva N. A. Breeding index as an economic component of the basis of breeding work in dairy cattle breeding. *Ekonomika sel'skokhozyaystvennykh i pererabatyvayushchikh predpriyatiy* = Economy of agricultural and processing enterprises. 2018;(8):29–33. (In Russ.). URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=35384793

Сведения об авторах

✉ **Алтухова Наталья Сергеевна**, кандидат с.-х. наук, доцент кафедры разведения, генетики и биотехнологии животных, ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева», ул. Тимирязевская, д. 49, г. Москва, Российская Федерация, 127434, e-mail: razvedenie@rgau-msha.ru, **ORCID: http://orcid.org/0000-0001-6169-3953**, e-mail: n.altukhova@rgau-msha.ru

Янчуков Иван Николаевич, доктор с.-х. наук, генеральный директор, АО «Московское» по племенной работе», ул. Соединительная, д. 7, г. Ногинск, Московская обл., Российская Федерация, 142401, e-mail: mos-bulls@mail.ru, **ORCID**: **http://orcid.org/0000-0002-6051-3655**

Савинов Антон Васильевич, аспирант кафедры разведения, генетики и биотехнологии животных, ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева», ул. Тимирязевская, д. 49, г. Москва, Российская Федерация, 127434, e-mail: razvedenie@rgau-msha.ru, **ORCID**: **http://orcid.org/0000-0002-6770-1990**

Иванов Юрий Анатольевич, доктор с.-х. наук, профессор, академик РАН, главный научный сотрудник, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», 1-й Институтский проезд, д. 5, г. Москва, Российская Федерация, 109428, e-mail: vim@vim.ru, **ORCID**: **http://orcid.org/0000-0002-6843-4556**

Information about the authors

✉ **Natalia S. Altukhova**, PhD in Agricultural Science, associate professor, the Department of Animal Breeding, Genetics and Biotechnology, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Timiryazevskaya st., 49, Moscow, Russian Federation, 127434, e-mail: razvedenie@rgau-msha.ru, **ORCID**: **http://orcid.org/0000-0001-6169-3953**, e-mail: n.altukhova@rgau-msha.ru

Ivan N. Yanchukov, DSc in Agriculture, general Director, JSC "Moscovskoye" Breeding Farm", Soedinitelnaya st., 7, Noginsk, Moscow region, Russian Federation, 142401, e-mail: mos-bulls@mail.ru, **ORCID**: **http://orcid.org/0000-0002-6051-3655**

Anton V. Savinov, post graduate student, the Department of Animal Breeding, Genetics and Biotechnology, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Timiryazevskaya st., 49, Moscow, Russian Federation, 127434, e-mail: razvedenie@rgau-msha.ru, **ORCID**: **http://orcid.org/0000-0002-6770-1990**

Yuri A. Ivanov, DSc in Agriculture, professor, academician of RAS, principal researcher, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 1st Institutsky proezd, 5, Moscow, Russian Federation, 109428, e-mail: vim@vim.ru, **ORCID: http://orcid.org/0000-0002-6843-4556**

✉ – Для контактов / Corresponding author

ВЕТЕРИНАРНАЯ МЕДИЦИНА/VETERINARY MEDICINE

https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.1.90-97
УДК 636:612.115:619

Зависимость коагуляционной активности крови коров *in vitro* от температуры

© 2024. Л. Л. Фомина ✉, Д. И. Березина, Т. С. Кулакова, К. Э. Моданова
ФГБОУ ВО «Вологодская государственная молочнохозяйственная академия имени Н. В. Верещагина», г. Вологда, с. Молочное, Российская Федерация

В работе представлены результаты исследования влияния температурного фактора на показатели свертывающего и противосвертывающего звена гемостаза крови коров. Цель работы – изучение коагуляционных показателей крови коров айрширской породы при гипо-, нормо- и гипертермии in vitro, а также оценка возможности применения коагулометра для характеристики активности гемостаза и использования гемостатических реакций крупного рогатого скота в качестве моделей для применения в медицине. Исследование проведено в Вологодской области. Анализировали следующие параметры коагулограммы: тромбиновое время (ТВ), протромбиновое время (ПВ), активированное частичное тромбопластиновое время (АЧТВ), активность фибриногена и антитромбина III (АТ-III). Установлено, что при 43 °С происходит гиперкоагуляция крови, в клоттинговых методах проявляющаяся как ускорение ТВ на 61 % (27 сек), ПВ – на 29 % (10 сек), удлинение АЧТВ – на 38 % (25 сек) и снижение активности Антитромбина III – на 51 % (5 сек) по сравнению с нормотермией. При 18 °С выявлена гипокоагуляция, сопровождающаяся удлинением всех показателей, характеризующих скорость образования сгустка: ТВ на 10 % (5 сек), ПВ на 61 % (55 сек), АЧТВ на 83 % (289 сек). Активность фибриногена снизилась на 82 % (106 сек), активность АТ-III выросла на 85 % (56 сек) по сравнению с нормотермией. Корреляционную связь между показателями гемостаза и температурным фактором можно охарактеризовать как отрицательную умеренную (АЧТВ), заметную (ТВ, фибриноген) и тесную (ПВ, АТ-III). При изучении коагуляционных механизмов коров использование медицинского коагулометра приводило к получению скоростей реакций, значительно отличающихся от происходящих при температуре тела этих животных, что не позволяет рекомендовать данный прибор для адекватной оценки гемостатических реакций крупного рогатого скота.

Ключевые слова: *крупный рогатый скот, гемостаз, коагулограмма, гипертермия, гипотермия*

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда № 23-26-00115, https://rscf.ru/project/23-26-00115/

Авторы благодарят рецензентов за их вклад экспертную оценку этой работы.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Фомина Л. Л., Березина Д. И., Кулакова Т. С., Моданова К. Э. Зависимость коагуляционной активности крови коров *in vitro* от температуры. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2024;25(1):90–97. DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.1.90-97

Поступила: 05.09.2023 Принята к публикации:24.01.2024 Опубликована онлайн: 28.02.2024

Dependence of blood coagulation activity on temperature in cows *in vitro*

© 2024. Lyubov' L. Fomina ✉, Dar'ya I. Berezina, Tat'yana S. Kulakova, Karina E. Modanova
Vologda State Dairy Farming Academy by N. V. Vereshchagin, Vologda, s. Molochnoe, Russian Federation

The paper presents the results of a study on how temperature affects the coagulation and anticoagulation processes in the hemostasis system of cows. The purpose of this work was to study the coagulation parameters of the blood of Ayrshire cows with hypo-, normo- and hyperthermia "in vitro", as well as to evaluate the possibility of using a coagulometer to characterize the activity of hemostasis and use hemostatic reactions in cattle as models for human medicine. The study was carried out in the Vologda region. The following parameters of the coagulation profile were analyzed: thrombin time (TT), prothrombin time (PT), activated partial thromboplastin time (APTT), fibrinogen and antithrombin III (AT-III) activity. Results showed that at 43 °C hypercoagulation of the blood occurred, which in clotting methods manifests itself as an acceleration of TT by 61 % (27 sec), PT by 29 % (10 sec), a prolongation of APTT by 38 % (25 sec) and a decrease in Antithrombin III activity by 51 % (5 sec) compared with normothermia. At 18 °C, hypocoagulation was detected, accompanied by an elongation of all indicators characterizing the rate of clot formation: TT by 10 % (5 sec), PT by 61 % (55 sec), APTT by 83 % (289 sec). Fibrinogen activity decreased by 82 % (106 sec), and AT-III activity increased by 85 % (56 sec) compared to normothermy.

The correlation between hemostasis parameters and the temperature factor can be characterized as negative moderate (APTT), noticeable (TV, fibrinogen) and close (PT, AT-III). Using a medical coagulometer caused reaction rates to differ significantly from those occurring at the body temperature of these animals when studying the coagulation mechanisms of cows. This does not allow to recommend this device for an adequate assessment of hemostatic reactions in cattle.

Keywords: *cattle, hemostasis, coagulogram, hyperthermia, hypothermia*

Acknowledgments: the research was financially supported by the Russian Science Foundation (Grant No. 23-26-00115), https://rscf.ru/project/23-26-00115/.

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*:* Fomina L.L., Berezina D. I., Kulakova T. S., Modanova K. E. Dependence of blood coagulation activity on temperature in cows *in vitro. Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2024;25(1):90–97. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.1.90-97

Received: 05.09.2023 Accepted for publication:24.01.2024 Published online: 28.02.2023

В последние годы, в связи с климатическими изменениями, увеличивается продолжительность жарких дней в районах Северо-Запада и Севера России, что может приводить к развитию теплового стресса у продуктивных животных. У коров, подвергшихся тепловому стрессу, учащается дыхание и пульс, увеличивается потребление воды и сокращается потребление кормов, нарушается кислотно-щелочной баланс, слизистые оболочки становятся гиперемированными и сухими. Эти симптомы соответствуют повышению сердечного выброса, когда кровь шунтируется к периферическим тканям для увеличения конвекционной потери тепла. Ректальная температура обычно составляет 40,5…43,0 °С. При усилении теплового удара происходит угнетение центральной нервной системы и циркуляторный шок. При полном исчерпании всех ресурсов для снижения температуры тела помощь животным при тепловом ударе уже практически невозможна [1, 2].

Смерть может наступить сразу или через несколько дней после тепловой нагрузки, даже если условия окружающей среды стали не стрессовыми. Точные механизмы гибели молочных коров от летального теплового стресса полностью не выяснены, но патофизиологические механизмы, по-видимому, схожи с происходящими у других видов животных. Уникальная физиология пищеварения жвачных животных добавляет дополнительные уровни сложности, которые способствуют отказу нескольких систем, связанных с летальным тепловым стрессом [3]. Одной из таких систем является тонко сбалансированная система гемостаза, которая ответственна за сохранение оптимального агрегатного состояния крови, предупреждение и остановку кровотечений, а также целостность кровеносных сосудов.

Исследования подтверждают, что многие компоненты каскадов комплемента и свертывания крови были изменены у коров, подвергшихся тепловому стрессу, по сравнению с коровами, у которых его не было [4].

В. С. Бурханс с соавторами (W. S. Burhans et al.) предпринята попытка описания физиологического ответа на тепловой стресс и патологических механизмов, приводящих к смертельному тепловому стрессу, в которых, помимо нарушений баланса электролитов, pH крови, гиперпроницаемости желудочно-кишечного тракта, сепсиса и тяжелого воспаления, вызванного активацией иммунной системы, большую роль играет развитие коагулопатий и диссеминированного внутрисосудистого свертывания крови (ДВС-синдрома), но, как утверждают сами авторы, это описание является предполагаемым, так как отсутствуют контролируемые и промежуточные эксперименты. Авторы работы приходят к выводу, что лучшее понимание механизмов летального теплового стресса ускорит диагностику, позволит сделать более точный прогноз и даст представление о стратегиях, направленных на предотвращение падежа и заболеваемости молочных коров [3].

Помимо гипертермии, достаточно большой интерес для исследователей представляет изучение влияния гипотермии на активность гемостатических механизмов. Снижение температуры тела может происходить как в результате экзогенных причин – понижения температуры окружающей среды, так и под влиянием причин эндогенного характера, таких как кровотечения, голодание и истощение организма, поражение центральной нервной системы, шок и других. Гипотермию рекомендуют применять в качестве терапевтического средства для пост-

реанимационных мероприятий [5] и используют животных в качестве моделей для изучения влияния гипотермии на гемостаз при сердечно-легочной реанимации. Авторы проведенного эксперимента доказали, что легкая гипотермия увеличивала сывороточные уровни физиологических антикоагулянтов у свиней [6].

Таким образом, изучение гемостазиологической активности крови животных при разных температурах также важно для гуманной медицины, поскольку коагулопатии исследуются на животных моделях (овцы [7] крысы [8], рыбы [9] свиньи [6, 10]) с разным термобиологическим статусом.

Цель исследований – изучить коагуляционные показатели крови коров при гипо-, нормо- и гипертермии *in vitro*, а также оценить возможности применения коагулометра для характеристики активности гемостаза и использования гемостатических реакций крупного рогатого скота в качестве моделей для применения в медицине.

Научная новизна – получены новые знания о функционировании плазменного гемостаза коров в условиях высоких и низких температур, показана необходимость применения ветеринарного коагулометра для оценки коагулогических реакций крупного рогатого скота.

Материал и методы. В исследовании использовали кровь 15 здоровых коров айрширской породы (*Bos taurus* Linnaeus, 1758) с привязным содержанием в возрасте от 4 до 6 лет, разных стадий лактации и живой массой 400–480 кг, принадлежащих СПК «Агрофирма Красная Звезда» Вологодского района.

Отбор проб крови проводили в вакуумные пробирки IMPROVACUTER, содержащие 3,8%-ный раствор цитрата натрия в соотношении 1:9 из хвостовой вены. Объект исследования – бедная тромбоцитами плазма, полученная в результате центрифугирования крови при 3000 оборотов в минуту в течение 20 мин.

Для оценки состояния плазменно-коагуляционного гемостаза коров определяли следующие показатели: АЧТВ (активированное частичное тромбопластиновое время); ПВ (протромбиновое время); ТВ (тромбиновое время); анализ активности фибриногена [11, 12]. Эти тесты основаны на триггерных реагентах, вызывающих образование фибринового сгустка в образце в присутствии фосфолипидов и кальция. Тромб обнаруживали механическим способом, основанным на измерении времени с момента внесения реагента, запускающего ферментативный процесс свертывания, до момента коагуляции (клоттинговыми методами) при температуре 37 °С на коагулометре Thrombostat производства Behnk Elektronik (Германия) и мануально (при периодическом покачивании пробирки) с использованием термостата медицинского водяного, серии TW: TW-2 (ELMI TW-2) при температуре 18 °С (гипотермия), 40 °С (температура «сердцевины» тела, свойственная коровам, нормотермия) и 43 °С (гипертермия). Поскольку эксперимент проводили *in vitro*, это позволило значительно понизить температуру для модели гипотермии и повысить для модели гипертермии в целях получения более яркой клоттинговой реакции, которую можно определить мануальным способом.

Антикоагуляционные свойства крови оценивали по активности Антитромбина III в плазме с помощью «Тех-Антитромбин-теста» при 18 °С, 24 °С, 28 °С, 37 °С, 40 °С, 43 °С. Принцип метода состоял в том, что Антитромбин III из плазмы, подвергнутой тепловому дефибринированию, инактивировал α-тромбин. Тестировали остаточную активность тромбина через 2 мин от начала инкубации дефибринированной плазмы с тромбином при разных температурах. По времени свёртывания оценивали активность Антитромбина III образца (принцип U. Abildgaard в модификации А. П. Момота и А. Н. Мамаева) [11].

Данные представлены в виде среднего и стандартной ошибки среднего (M±m). Нормальность распределения оценивали с помощью критерия Колмогорова-Смирнова. Для оценки достоверности различий в множественных зависимых выборках использовали критерий Вилкоксона. Проверку статистической значимости коэффициентов корреляции осуществляли с помощью критерия Фишера (F-критерий) (однофакторный дисперсионный анализ, One-way ANOVA).

Результаты и их обсуждение. Исследования *in vitro* плазмы коров показали, что высокая температура приводит к изменению каскада коагуляции (табл. 1), что отмечали исследователи и у других млекопитающих – грызунов [13], псовых [14, 15], приматов [16, 17].

При гипертермии (43 °С) по сравнению с нормотермией для коров (40 °С) на 61 % сократилось тромбиновое время (ТВ) и на 29 % протромбиновое время (ПВ).

Таблица 1 – **Сравнительный анализ показателей гемостаза коров при разных температурах (n = 15), с /**
Table 1 – **Comparative analysis of indicators of hemostasis of cows at different temperatures (n = 15), s**

Показатель / Parameter	*Температура, °С / Temperature, °С*			
	18	*37*	*40*	*43*
Тромбиновое время / Thrombin time	50,09±6,22^{dg}	26,54±1,74^{afg}	45,17±4,63^{dg}	18,01±2,11^{adf}
Протромбиновое время / Prothrombin time	89,51±12,79^{dfg}	55,13±13,68^{ag}	34,57±1,68^{ag}	24,88±2,58^{adf}
Активированное частичное тромбопластиновое время / Activated partial thromboplastin time	353,09±14,89^{dfg}	62,83±2,34^{a}	64,31±6,85^{a}	88,91±29,19^{a}
Активность фибриногена / Fibrinogen activity	130,15±27,00^{dfg}	12,46±1,20^{afg}	23,90±5,67^{ad}	24,77±5,45^{ad}

Примечания: Различия с аналогичным параметром достоверны (p≤0,05): a – при 18 °С; d – при 37 °С; f – при 40 °С; g – при 43 °С /

Notes: Differences of analogical parameter are reliable (p≤0.05): a – in 18 °С; d – in 37 °С; f – in 40 °С; g – in 43 °С

ТВ – тест, который характеризует конечный этап свертывания крови, измеряет скорость превращения фибриногена в фибрин под действием тромбина, внесенного извне. ПВ указывает на активность внешнего пути свертывания крови, характеризует первую (образование протромбиназы) и вторую (образование тромбина) фазы свертывания крови и отражает активность протромбинового комплекса (факторов VII, V, X и собственно протромбина – фактора II). Укорочение данных показателей свидетельствует о риске тромбообразования и может наблюдаться при первой фазе ДВС-синдрома (гиперкоагуляции).

Одновременно, активированное частичное тромбопластиновое время (АЧТВ), показатель, характеризующий активность внутреннего (плазменного) пути свертывания крови, удлинилось на 38 %. АЧТВ-тест, выявляющий исключительно плазменные дефекты активации X-фактора у млекопитающих, представляет собой многоступенчатый процесс, в результате которого в крови накапливается комплекс факторов, способных превратить протромбин в тромбин. Увеличение данного показателя при тепловом ударе у собак рекомендуют в числе прочих использовать в качестве маркера близкого летального исхода [15].

Активность фибриногена достоверно не отличалась при 40 °С и 43 °С, но значительно отличалась от показателей, полученных при 37°С и 18 °С. Высокую активность фибриногена при 37 °С можно связать с использованием в данном тесте в качестве агониста человеческого тромбина, который наиболее активен именно при этой температуре.

При гипотермии (18 °С) происходило удлинение времени образования фибринового сгустка во всех тестах. ТВ увеличилось на 10 %, ПВ – на 61 %, АЧТВ – на 83 % (289 с) и снизилась активность фибриногена на 82 % (106 с), что указывает на гипокоагуляцию крови коров *in vitro* при охлаждении.

Обратная ситуация происходила с противосвертывающим звеном системы гемостаза, активность которой обеспечивает белок Антитромбин III (рис. 1).

При понижении температуры активность Антитромбина III значительно выросла (на 85 %), что согласуется с данными других исследователей, которые заключают, что легкая гипотермия оказывает антикоагулянтное действие при охлаждении и это может оказывать ингибирующее действие на образование микротромбов [6]. Активация антитромбина при гипотермии возможно является тем механизмом, который приводит к подавлению выработки белка теплового шока 47 (HSP47), что, по последним исследованиям, ослабляет активацию иммунных клеток и образование нейтрофильных внеклеточных ловушек, способствуя тромбозащите у медведей, свиней, пациентов с травмами спинного мозга и мышей [18].

На рисунке 2 представлено графическое изображение корреляционной зависимости между температурой инкубации плазмы крови коров и активностью антитромбина.

Коэффициент детерминации показал, что активность антитромбина на 60 % зависит от температуры, а эмпирическое корреляционное отношение составило R = -0,80, что говорит о высокой отрицательной связи между активностью этого белка и температурой инкубации плазмы крови коров.

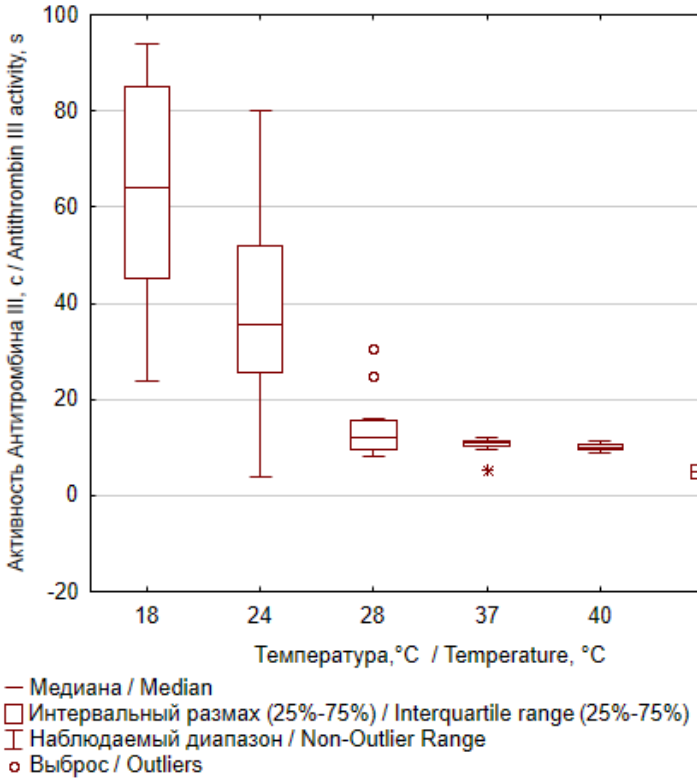

Рис. 1. **Активность Антитромбина III (АТ-III) плазмы коров при различных температурных режимах инкубации /**

Fig. 1. **Antithrombin III (AT-III) activity of cow plasma under different temperature conditions of incubation**

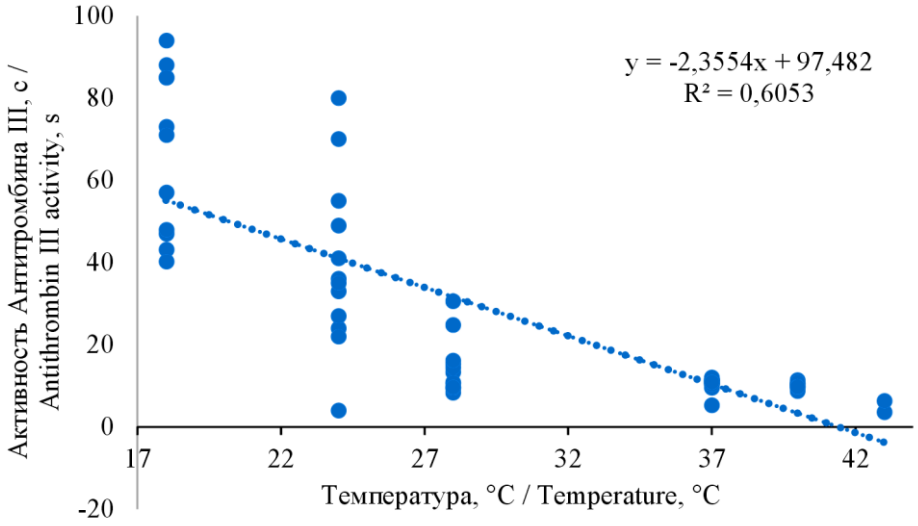

Рис. 2. **Корреляционно-регрессионная зависимость активности Антитромбина III (АТ-III) плазмы коров от температуры инкубации /**

Fig. 2. **Correlation-regression dependence between the Antithrombin III activity (AT-III) of cow plasma and the incubation temperature**

Корреляционно-регрессионный и однофакторный дисперсионный анализ (One-way ANOVA) выявили высокую зависимость от температуры ПВ и АЧТВ, коэффициент детерминации которых составил 60 и 44 % соответственно (рис. 3).

В соответствии со шкалой Чеддока корреляционную связь между показателями гемостаза и температурным фактором можно охарактеризовать как отрицательную умеренную (АЧТВ), заметную (ТВ, фибриноген) и тесную (ПВ, АТ-III) (табл. 2).

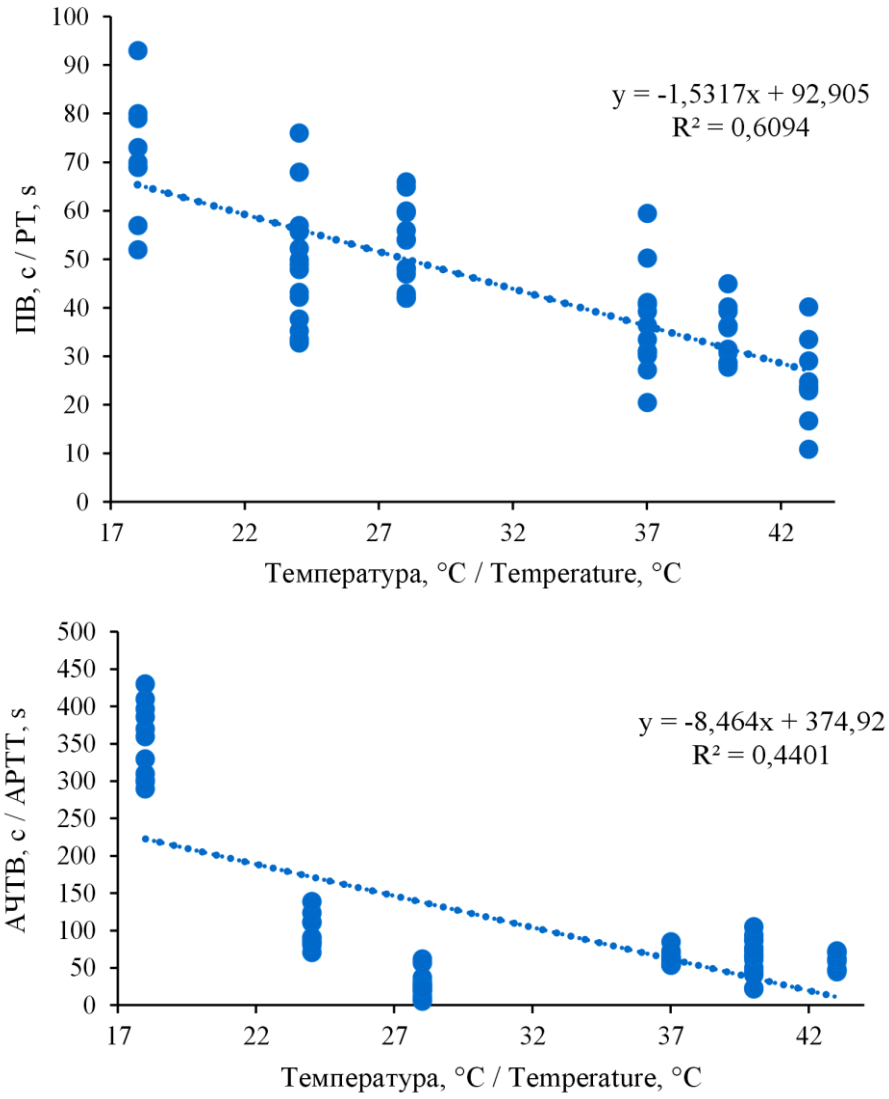

Рис. 3. **Корреляционно-регрессионная зависимость ПВ и АЧТВ плазмы коров от температуры инкубации /**
Fig. 3. **Correlation-regression dependence between PT and APTT of cow plasma and incubation temperature**

Таблица 2 – **Коэффициенты выявленных корреляций и параметры дисперсионного анализа данных зависимости плазменного гемостаза коров от температуры /**
Table 2 – **Coefficients of correlations and parameters of dispersion analysis of data on the dependence of plasma hemostasis of cows on temperature**

Факторная переменная X / Factor variable X	*Зависимая переменная Y / Dependent variable Y*	*R*	*F*	*Значимость F / F-test significance*
Температура / Temperature	Тромбиновое время / Thrombin time	-0,50	15,92551	p<0,01
	Протромбиновое время / Prothrombin time	-0,79	28,23903	p<0,01
	Активированное частичное тромбопластиновое время / Activated partial thromboplastin time	-0,44	257,4119	p<0,01
	Активность фибриногена / Fybrinogen activity	-0,51	17,38849	p<0,01
	Активность антитромбина III / Antithrombin III activity	-0,80	26,85563	p<0,01

Примечание: R – индекс корреляции; F – расчетное значение F-критерия /
Note: R – correlation index; F – F-value

Заключение. Таким образом, можно заключить, что повышение температуры приводит к гиперкоагуляции крови *in vitro*, активируя каскад свертывания и угнетая активность противосвертывающей системы, гипотермия оказывает обратный эффект на эти два звена системы гемостаза. Полученные результаты согласуются с результатами зарубежных авторов, которые делают вывод, что гиперкоагуляции во время теплового удара вызывает локальную гипоперфузию, тканевую гипоксию и последующую органную дисфункцию, а гипотермия на модельных организмах может служить защитой от повышенного тромбообразования.

Анализируя полученные результаты с точки зрения использования животных в качестве моделей для медицинских исследований гемостазиологических реакций, можно отметить, что только показатель АЧТВ крови коров, полученный при инкубации крови в медицинском коагулометре (при 37 °С), не имел достоверных отличий от АЧТВ, полученном при других температурах, поэтому можно рекомендовать внутренний путь активации протромибиназы коров использовать в качестве модельного. Во всех остальных случаях использования данных жвачных в качестве тест-объектов рекомендуется учитывать выявленные особенности и для получения коагулограммы использовать приборы, которые будут брать в расчет разный термобиологический статус животных. Кроме этого, можно согласиться с выводами отечественных и зарубежных авторов, которые рекомендуют соблюдать осторожность при интерпретации результатов гемостатических тестов у животных и при экстраполяции результатов для людей, поскольку возможные различия между значениями могут быть связаны с вариациями видов и/или методологическими ошибками, для уменьшения частоты и степени лабораторных ошибок необходимы стандартизированные тест-системы, сопряженность используемых реагентов и анализаторов, сертификация рабочих реагентов по Международным или национальным стандартам.

References

1. Буряков Н. П., Бурякова М. А., Алешин Д. Е. Тепловой стресс и особенности кормления молочного скота. Российский ветеринарный журнал. 2016;(3):5–13. Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=26538900 EDN: WITNHF

Buryakov N. P., Buryakova M. A., Aleshin D. E. Heat stress and feeding features of the dairy cattle. *Rossiyskiy veterinarnyy zhurnal* = Russian veterinary journal. 2016;(3):5–13. (In Russ.). URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=26538900

2. Mandal D. K., Bhakat C., Dutta T. K. Impact of environmental factors on physiological adaptability, thermotolerance indices, and productivity in Jersey crossbred cows. International Journal of Biometeorology. 2021;65:1999–2009. DOI: https://doi.org/10.1007/s00484-021-02157-2

3. Burhans W. S., Rossiter Burhans C. A., Baumgard L. H. Invited review: Lethal heat stress: The putative pathophysiology of a deadly disorder in dairy cattle. Journal of Dairy Science. 2022;105(5):3716–3735. DOI: https://doi.org/10.3168/jds.2021-21080

4. Min L., Cheng J., Zhao S., Tian H., Zhang Y., Li S., Yang H., Zheng N., Wang J. Plasma-based proteomics reveals immune response, complement and coagulation cascades pathway shifts in heat-stressed lactating dairy cows. Journal of Proteomics. 2016;146:99–108. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jprot.2016.06.008

5. Xu S., Miao H., Gong L., Feng L., Hou X., Zhou M., Shen H., Chen W. Effects of Different Hypothermia on the Results of Cardiopulmonary Resuscitation in a Cardiac Arrest Rat Model. Disease Markers. 2022;2022:2005616. DOI: https://doi.org/10.1155/2022/2005616

6. Wu J., Yuan W., Li J., Zhao Yo., Li J., Li Zh., Li Ch. Effects of Mild Hypothermia on Cerebral Large and Small Microvessels Blood Flow in a Porcine Model of Cardiac Arrest. Neurocritical Care. 2017;27:297–303. DOI: https://doi.org/10.1007/s12028-017-0395-6

7. Груздева О. В., Бычкова Е. Е., Пенская Т. Ю., Кузьмина А. А., Антонова Л. В., Барбараш Л. С. Сравнительная характеристика гемостазиологического профиля овец и пациентов с сердечно-сосудистой патологией как основа для прогнозирования тромботических рисков в ходе преклинических испытаний сосудистых протезов. Современные технологии в медицине. 2021;13(1):52–58. DOI: https://doi.org/10.17691/stm2021.13.1.06 EDN: TJKDPF

Gruzdeva O. V., Bychkova E. E., Penskaya T. Yu., Kuz'mina A. A., Antonova L. V., Barbarash L. S. Comparative analysis of the hemostasiological profile in sheep and patients with cardiovascular pathology as the basis for predicting thrombotic risks during preclinical tests of vascular prostheses. *Sovremennye tekhnologii v meditsine* = Modern technologies in medicine. 2021;13(1):52–58. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.17691/stm2021.13.1.06

8. Николаев В. Ю., Шахматов И. И., Киселев В. И., Вдовин В. М. Система гемостаза крыс при разных режимах одиночной гипертермической нагрузки. Современные проблемы науки и образования. 2014;(4):509. Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=22285841 EDN: STRSFH

Nikolaev V. Yu., Shakhmatov I. I., Kiselev V. I., Vdovin V. M. Rat,s hemostasis system in different modes of the single hyperthermical load. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* = Modern problems of science and education. 2014;(4):509. (In Russ.). URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=22285841

9. Berezina D. I., Fomina L. L. influence of cortisol analogs on secondary hemostasis indices in Cyprinus carpio carp. Inland Water Biology. 2022;15(5):659–666. DOI: https://doi.org/10.1134/s1995082922050042

10. Münster A. M., Olsen A. K., Bladbjerg E. M. Usefulness of human coagulation and fibrinolysis assays in domestic pigs. Comparative Medicine. 2022;52(1):39–43.

11. Баркаган З. С., Момот А. П. Диагностика и контролируемая терапия нарушений гемостаза. М.: изд-во ООО Медико-технологическое предприятие «Ньюдиамед-АО», 2008. 292 с.

Barkagan Z. S., Momot A. P. Diagnosis and controlled therapy of hemostasis disorders. Moscow: *izd-vo OOO Mediko-tekhnologicheskoe predpriyatie «N'yudiamed-AO»*, 2008. 292 p.

12. Берковский А. Л., Сергеева Е. В., Суворов А. В. Диагностика нарушений гемостаза у животных. Ветеринария. 2018;(5):54–57. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=34857914 EDN: XMGDRZ

Berkovskiy A. L., Sergeeva E. V., Suvorov A. V. Diagnosis of hemostasis disorders in animals. *Veterinariya* = Veterinary. 2018;(5):54–57. (In Russ.). URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=34857914

13. Proctor E. A., Dineen S. M., Van Nostrand S. C., Kuhn M. K., Barrett C. D., Brubaker D. K., Yaffe M. B., Lauffenburger D. A., Leon L. R. Coagulopathy signature precedes and predicts severity of end-organ heat stroke pathology in a mouse model. Journal of thrombosis and haemostasis. 2020;18(8):1900–1910. DOI: https://doi.org/10.1111/jth.14875

14. Bruchim Y., Kelmer E., Cohen A., Codner C., Segev G., Aroch I. Hemostatic abnormalities in dogs with naturally occurring heatstroke. Journal of Veterinary Emergency and Critical Care. 2017;27(3):315–324. DOI: https://doi.org/10.1111/vec.12590

15. Bruchim Y., Horowitz M., Aroch I. Pathophysiology of heatstroke in dogs–revisited. Temperature. 2017;4(4):356–370. DOI: https://doi.org/10.1080/23328940.2017.1367457

16. Bouchama A., Roberts G., Al Mohanna F., El-Sayed R., Lach B., Chollet-Martin S., Ollivier V., Al Baradei R., Loualich A., Nakeeb S., Eldali A., De Prost D. Inflammatory, hemostatic, and clinical changes in a baboon experimental model for heatstroke. Journal of Applied Physiology. 2005;98(2):697–705. DOI: https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00461.2004

17. Leon L. R., Helwig B. G. Heat stroke: role of the systemic inflammatory response. Journal of applied physiology. 2010;109(6):1980–1988. DOI: https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00301.2010

18. Thienel M., Müller-Reif J. B., Zhang Z., Ehreiser V., Huth J., Shchurovska K., Kilani B., Schweizer L., Geyer P. E., Zwiebel M., Novotny J., Lüsebrink E., Little G., Orban M., Nicolai L., El Nemr S., Titova A., Spannagl M., Kindberg J., Evans A. L., Mach O., Vogel M., Tiedt S., Ormanns S., Kessler B., Dueck A., Friebe A., Jørgensen P. G., Majzoub-Altweck M., Blutke A., Polzin A., Stark K., Kääb S., Maier D., Gibbins J. M., Limper U., Frobert O., Mann M., Massberg S., Petzold T. Immobility-associated thromboprotection is conserved across mammalian species from bear to human. Science. 2023;380(6641):178–187. DOI: https://doi.org/10.1126/science.abo5044

Сведения об авторах

✉ **Фомина Любовь Леонидовна,** кандидат биол. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Вологодская государственная молочнохозяйственная академия им. Н. В. Верещагина», ул. Шмидта, д. 2, с. Молочное, Вологда, Российская Федерация, 160555, e-mail: academy@molochnoe.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6850-6663,** e-mail: fomina.l.l@2.molochnoe.ru

Березина Дарья Игоревна, кандидат биол. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Вологодская государственная молочнохозяйственная академия им. Н. В. Верещагина», ул. Шмидта, д. 2, с. Молочное, Вологда, Российская Федерация, 160555, e-mail: academy@molochnoe.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5243-7808**

Кулакова Татьяна Сергеевна, кандидат с.-х. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Вологодская государственная молочнохозяйственная академия им. Н. В. Верещагина», ул. Шмидта, д. 2, с. Молочное, Вологда, Российская Федерация, 160555, e-mail: academy@molochnoe.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6247-4699**

Моданова Карина Эдуардовна, студент-специалист, ФГБОУ ВО «Вологодская государственная молочнохозяйственная академия им. Н. В. Верещагина», ул. Шмидта, д. 2, с. Молочное, Вологда, Российская Федерация, 160555, e-mail: academy@molochnoe.ru

Information about the author

✉ **Lyubov' L. Fomina,** PhD in Biological Science, associate professor, Vologda State Dairy Farming Academy by N. V. Vereshchagin, Schmidt str., 2, Molochnoe, Vologda, Russian Federation, 160555, e-mail: academy@molochnoe.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6850-6663,** e-mail: fomina.l.l@2.molochnoe.ru

Dar'ya I. Berezina, PhD in Biological Science, associate professor, Vologda State Dairy Farming Academy by N. V. Vereshchagin, Schmidt str., 2, Molochnoe, Vologda, Russian Federation, 160555, e-mail: academy@molochnoe.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5243-7808**

Tat'yana S. Kulakova, PhD in Agricultural Science, associate professor, Vologda State Dairy Farming Academy by N. V. Vereshchagin, Schmidt str., 2, Molochnoe, Vologda, Russian Federation, 160555, e-mail: academy@molochnoe.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6247-4699**

Karina E. Modanova, student, Vologda State Dairy Farming Academy by N. V. Vereshchagin, Schmidt str., 2, Molochnoe, Vologda, Russian Federation, 160555, e-mail: academy@molochnoe.ru

✉ – Для контактов / Corresponding author

МЕХАНИЗАЦИЯ, ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ, АВТОМАТИЗАЦИЯ / MECHANIZATION, ELECTRIFICATION, AUTOMATION

https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.1.98-111
УДК 631.34+635.1

Обоснование инновационной технологии сортофитопрочистки в селекционно-семеноводческих посадках картофеля и овощных культур

© 2024. А. С. Дорохов ✉, А. Г. Аксенов, А. В. Сибирёв, М. А. Мосяков, Н. В. Сазонов

ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», г. Москва, Российская Федерация

Цель исследований – теоретически обосновать процесс сортофитопрочистки в селекционно-семеноводческих посадках картофеля и овощных культур с использованием технологий машинного зрения и элементов роботизации. В статье выполнен анализ современных неразрушающих методов обнаружения заболеваний биологических объектов; технологических процессов и машин для удаления плодов овощных культур с растения в системе цифрового сельскохозяйственного производства с элементами роботизации на операциях ухода за растениями и сбора товарной продукции. Установлена актуальность разработки инновационной технологии и технических средств для удаления зараженных растений картофеля и овощных культур в селекции и семеноводстве. Для проведения оздоровительных приемов производства семян овощных культур и картофеля разработана инновационная технология и машина для удаления зараженных растений картофеля и овощных культур в селекционно-семеноводческих посадках, обеспечивающая движение по полю с использованием технологий машинного зрения с определением заражённого растения или растения, не соответствующего сортовым признакам с последующим его удалением. В процессе исследований (2021-2022 гг.) разработаны морфологическая матрица выбора технических средств использования функционирующих элементов реализации инновационной технологии сортофитопрочистки овощных культур и картофеля, а также теоретические основы инновационной технологии удаления зараженных биологических объектов. Выявлен показатель эффективности реализации инновационной технологии сортофитопрочистки, учитывающий параметры экономических и агротехнических показателей, а также металлоемкости, энергоемкости, экологичности и надежности. Представлены аналитические исследования машинной технологии и технических средств удаления зараженных растений овощных культур и картофеля. Выполнено обоснование инновационной технологии сортофитопрочистки овощных культур и картофеля, в части исключения в технологии обнаружения зараженных растений картофеля беспилотного летательного аппарата с качественной оценкой целесообразности выбора технических средств при использовании функционирующих элементов реализации разрабатываемой технологии по критериям экономической и агротехнической оценки, а также металлоемкости, энергоемкости и надежности. Оценка целесообразности выбора технических средств для функционирования элементов инновационной технологии показала, что по комплексу критериев процесс сортофитопрочистки овощных культур и картофеля целесообразно осуществлять без применения беспилотного летательного аппарата, используя в конструкции машины оптическую систему идентификации зараженных растений.

Ключевые слова: *удаление зараженных растений, технологическая платформа, исходные требования*

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (№ темы FGUN-2022-003).

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Дорохов А. С., Аксенов А. Г., Сибирёв А. В., Мосяков М. А., Сазонов Н. В. Обоснование инновационной технологии сортофитопрочистки в селекционно-семеноводческих посадках картофеля и овощных культур. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2024;25(1):98–111. DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.1.98-111

Поступила: 18.07.2023 Принята к публикации: 22.01.2024 Опубликована онлайн: 28.02.2024

Justification of innovative technology for variety and phytocleaning in breeding and seed plantings of potatoes and vegetable crops

© 2024. Aleksey S. Dorokhov✉ , Alexander G. Aksenov, Aleksey V. Sibirev, Maksim A. Mosyakov, Nikolai V. Sazonov

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

The purpose of the research is to substantiate theoretically the process of variety and phytocleaning in breeding and seed plantings of potatoes and vegetable crops using machine vision technologies and robotic elements. The article analyzes modern non-destructive methods for detecting diseases of biological objects; technological processes and machines for removing the fruits of vegetable crops from plants in a digital agricultural production system with elements of robotization in the operations of caring for plants and collecting marketable products. The relevance of developing innovative technology and technical means for removing infected potato and vegetable plants in breeding and seed production has been established. To carry out health-improving techniques for the production of vegetable and potato seeds, an innovative technology and machine have been developed for removing infected potato and vegetable crop plants in breeding and seed-growing plantings, providing movement across the field using machine vision technologies with the identification of an infected plant or a plant that does not correspond to the varietal characteristics with its subsequent removal. In the process of the research (2021-2022), a morphological matrix for selecting technical means of using functioning elements for implementing innovative technology for varietal and phytocleaning of vegetable crops and potatoes, as well as the theoretical foundations of innovative technology for removing contaminated biological objects, were developed. An indicator of the effectiveness of the implementation of innovative phytotype cleaning technology has been identified, taking into account the parameters of economic and agrotechnical indicators, as well as metal intensity, energy intensity, environmental friendliness and reliability. Analytical studies of machine technology and technical means for removing infected vegetable and potato plants are presented. A substantiation of the innovative technology for varietal and phytocleaning of vegetable crops and potatoes has been carried out, in terms of the exclusion of an unmanned aerial vehicle in the technology for detecting infected potato plants with a qualitative assessment of the feasibility of choosing technical means when using the functioning elements of the implementation of the developed technology according to the criteria of economic and agrotechnical assessment, as well as metal intensity, energy intensity and reliability . An assessment of the feasibility of choosing technical means for the functioning of elements of innovative technology showed that, according to a set of criteria, the process of varietal and phytocleaning of vegetable crops and potatoes is advisable to carry out without the use of an unmanned aerial vehicle, using an optical system for identifying infected plants in the design of the machine.

Keywords: *removing of infected plants, technological platform, initial requirements*

***Acknowledgements**:* the research was carried out under the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM (theme No. FGUN-2022-003).

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

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

For citation: Dorokhov A. S., Aksenov A. G., Sibirev A. V., Mosyakov M. A., Sazonov N. V. Justification of innovative technology for variety and phytocleaning in breeding and seed plantings of potatoes and vegetable crops. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2024;25(1):98–111. (In Russ.).
DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.1.98-111

Received: 18.07.2023 Accepted for publication: 22.01.2024 Published online: 28.02.2024

Получение стабильных, высоких и качественных урожаев сельскохозяйственных культур в различных почвенно-климатических условиях требует выведения и адаптации новых сортов, что сопряжено с рядом специфических трудно механизируемых операций полевой стадии производства и обработки урожая на селекционно-опытных делянках [1, 2].

Кроме обычного агротехнического ухода, на семеноводческих посадках проводят специальные оздоровительные приемы, способствующие повышению качества, т. е. тщательные сортовые и фитопатологические прочистки с удалением больных растений и примесей, которые выполняются селекционерами нашей страны с использованием ручного труда: движение по учетной делянке, визуальное определение зараженных растений, ручное извлечение зараженного клубневого гнезда, утилизация клубневого гнезда в контейнер с последующим движением по инспектируемой площади. Для замены ручного труда при выполнении данных технологических операций предприятиями зарубежного сельскохозяйственного машиностроения освоено производство комплекса машин, обеспечивающее работы от посадки до послеуборочной обработки продукции [1, 2].

Стратегическое решение проблемы механизации процессов селекции, сортоиспытания в первичном семеноводстве овощных культур в России закупкой машин за рубежом нецелесообразно из-за высокой стоимости не только самих машин, но и комплектующих к ним и других расходных материалов.

Следовательно, актуальность проведения исследований по разработке машин, обеспечивающих выполнение оздоровительных прие-

мов на семеноводческих делянках овощных культур и картофеля, обусловлена необходимостью осуществления работ по выведению новых перспективных сортов, которые являются основой продовольственной безопасности государства, а также обеспечения населения безопасными продуктами питания [3, 4].

Одним из сдерживающих факторов более интенсивного увеличения площадей возделывания и объема валового сбора овощных культур и картофеля является нерешённая проблема выполнения комплекса агротехнических приемов, ограничивающих распространение вирусных, грибных и бактериальных болезней в процессе роста и развития растений [5].

Для удаления сорняков и зараженных культурных растений компании США и стран Евросоюза разработали огневой культиватор, обеспечивающий проведение технологических операций по подготовке почвы перед посадкой и после при выжигании сорняков термическим воздействием на поверхностный слой почвы[1].

Огневой культиватор (рис. 1), установленный на трехточечную навеску трактора, работает на сжиженном газе, содержащемся в баллонах, максимальная полезная ширина действия 1,8 м. Культиватор имеет газовую горелку, состоящую из газового сопла, смесителя, коллектора и воздушных сопел. Горелка работает на газовоздушных смесях, состав которых вне пределов воспламеняемости.

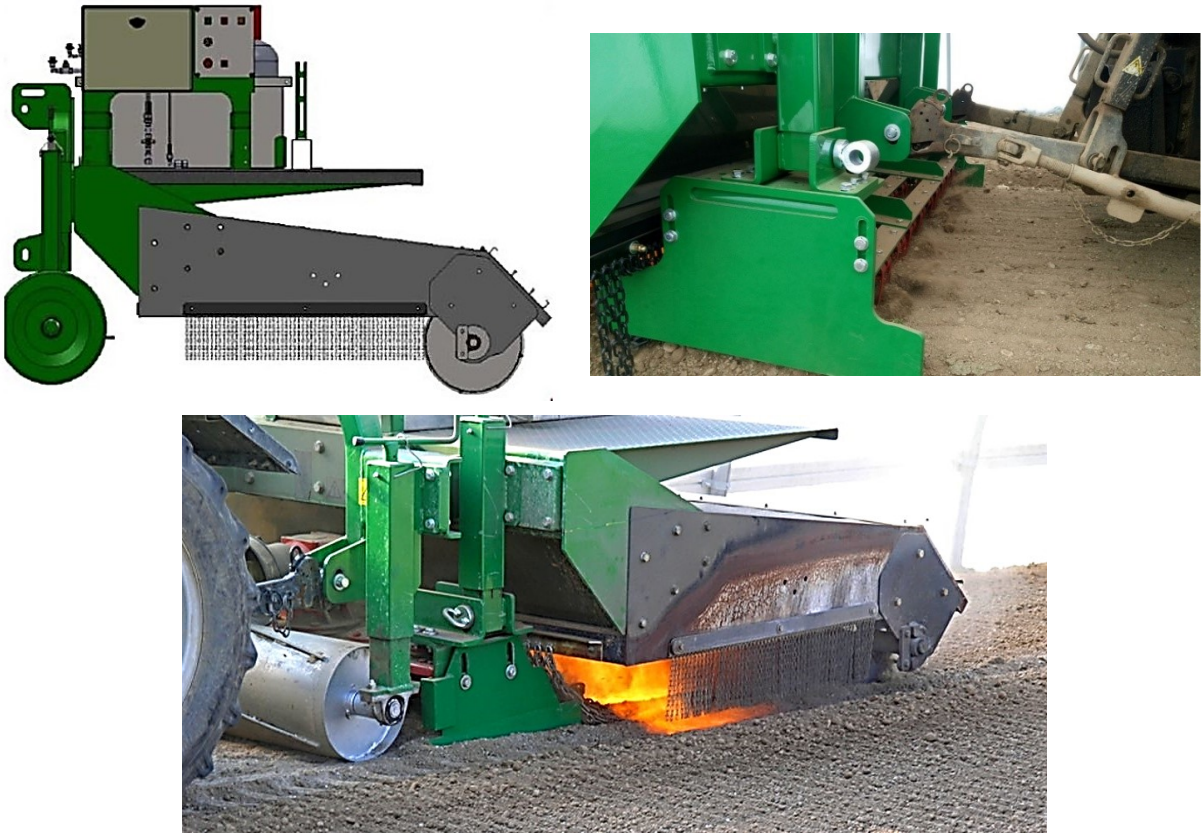

Рис. 1. **Схема и общий вид огневого культиватора Mingozzi PTRB 1800 SP /**
Fig. 1. **Diagram and general view of the fire cultivator Mingozzi PTRB 1800 SP**

При движении жесткие высокоскоростные с температурой 400–600 °С факелы огневого культиватора воздействуют на поверхность почвы. Огневая культивация полностью уничтожает всходы однолетних сорняков, возбудителей болезней и вредителей на поверхности почвы, стимулирует прорастание культурных растений, на 85–90 % сокращает засоренность в последующий вегетационный период. Существенным недостатком данного технического средства является сплошной характер воздействия на обрабатываемую среду, что приводит к повреждениям культурных растений и отсутствию дифференциации по признакам заражений

[1]Вольф А. Н., Монахос Г. Ф., Леунов В. И. Машины в селекции и семеноводстве овощных культур: учебное пособие. М.: изд-во РГАУ–МСХА имени К. А. Тимирязева, 2012. 218 с. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=vnkqbn

в автоматическом режиме. Для устранения данного недостатка необходимо обеспечить дифференцированное огневое воздействие на сорняки, т. е. разработать цифровую систему контроля и управления процессом обработки.

В настоящее время имеются различные машинно-технологические комплексы для удаления зараженных растений картофеля и овощных культур, которые выполняют технологический процесс по запланированному алгоритму.

Необходимость разработки машинно-технологического комплекса отечественного производства для выполнения операций по распознаванию, извлечению и утилизации зараженных растений овощных культур и картофеля определяет возможность получения безвирусного семенного материала, что позволит обеспечить продовольственную безопасность страны вне зависимости от внешних условий [6, 7].

Предприятиями зарубежного сельскохозяйственного машиностроения выпускаются одноименные по принципу действия машины для удаления зараженных растений при вариации энергетических затрат, рядности рабочей зоны, а также вида привода и ширины колеи [8, 9]. К наиболее распространенным организациям-изготовителям данного вида машин относятся VSS Agro, Goucon Selection, Gerkon techniek, линейка продукции которых представлена на рисунке 2, основные технические характеристики машин – в таблице 1.

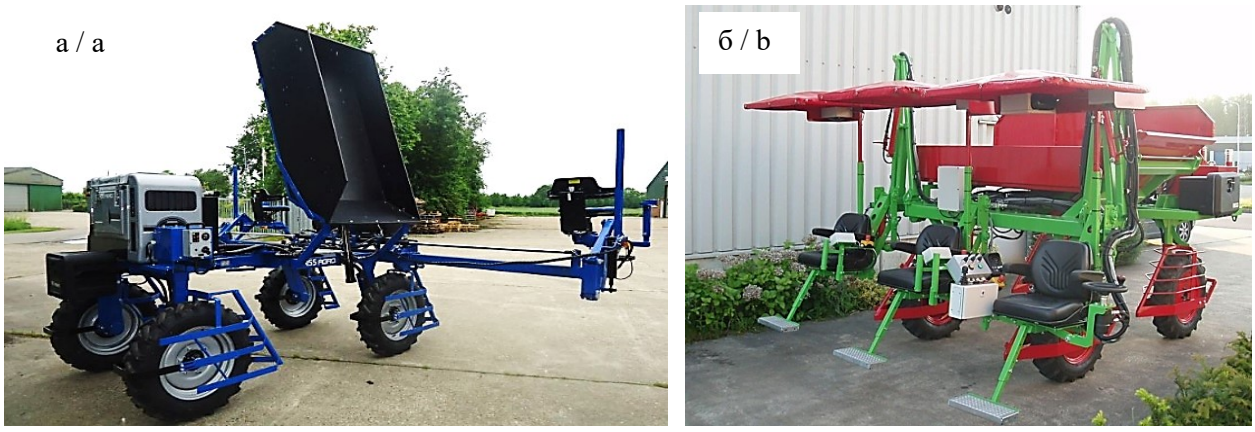

Рис. 2. **Общий вид машин для сортофитопрочистки посадок овощных культур и картофеля: а – VSS Agro Selection; б – Goucon Selection /**

Fig. 2. **General view of the machine for variety and phytocleaning of vegetable crops and potato plantings: a – VSS Agro Selection; b – Goucon Selection**

Таблица 1 – **Техническая характеристика машин для сортофитопрочистки посадок овощных культур и картофеля VSS Agro Selection и Goucon Selection /**

Table 1 – **Technical characteristics of the machine for variety and phytocleaning of plantings of vegetable crops and potatoes VSS Agro Selection and Goucon Selection**

Наименование показателя / Name of indicator	*VSS Agro Selection*	*Goucon Selection*
Привод ходовой системы машины / Drive system of the machine	Гидравлический / Hydraulic	
Колесная формула / Wheel formula	4×4	4×4
Силовая установка / Power unit	Дизельный двигатель / Diesel engine Perkins PowerPack	
Управление / Control	Дистанционное / Remote	
Привод съемного бункера / Removable hopper drive	Гидравлический / Hydraulic	
Ширина колеи, мм / Track width, mm	1800	1500–2000

Широкое внедрение робототехники в сельском хозяйстве на операциях от посадки до закладки товарной продукции на хранение обеспечивается с 1990-х годов и по настоящее время[2] [10].

В исследуемой предметной области по идентификации сельскохозяйственных культур и извлечении их из почвы или с куста растения известны прототипы для сбора огурца [11, 12], клубники [13, 14] и других сельскохозяйственных культур, обеспечивающие выполнение операций без применения труда человека по разработанному алгоритму работы при использовании оптических систем идентификации биологических объектов.

В настоящий момент в мире не представлены единые машинно-технологические комплексы, обеспечивающие комплексное выполнение операций с автоматизированным распознаванием, удалением, утилизацией зараженных растений овощных культур и картофеля и последующем движении по учетной делянке без привлечения оператора управления, следовательно, анализ технических решений представлен по отдельным технологическим операциям – распознаванию и удалению биологического объекта с растения.

Исследования по автоматизированной идентификации биологических объектов и последующего их удаления фокусируется на трех ключевых моментах: идентификация, выделение исследуемого объекта по признаку распознавания и последующее его извлечение [15].

Известна машина для сбора плодов томата с куста растения (рис. 3), состоящая из автономного транспортного средства, перемещающегося по рельсам, манипулятора с шестью степенями свободы, исполнительного рабочего органа, блока технического зрения, а также контролера управления режимными и технологическими параметрами машины [16].

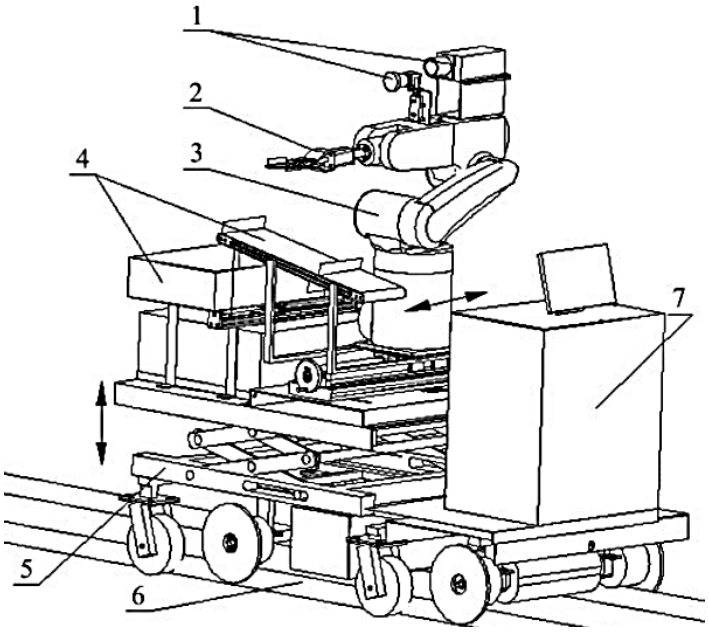

Рис. 3. **Общий вид машины для сбора плодов с кустов томата: 1 – блок технического зрения; 2 – рабочий орган; 3 – манипулятор; 4 – сборщик плодов; 5 – платформа; 6 – рельс; 7 – контейнер**

Fig 3. **Tomato harvesting robot configuration: 1 – stereo visual unit; 2 – end-effector; 3 – manipulator; 4 – fruit collector; 5 – platform; 6 – rail; 7 – container**

Манипулятор 3 и рабочий орган 2 устанавливаются на платформу 5 таким образом, чтобы выполнить сбор томатов с разной высоты растения. Кроме того, рабочие органы могут перемещаться по горизонтали, чтобы обеспечить их автоматическую адаптацию к различным вариантам посадок растений.

При идентификации исследуемого биологического объекта системой технического зрения 1 происходит автоматическая остановка платформы 5 рядом с кустом томата и обеспечивается захват плода рабочим органом 2 и его перемещение манипулятором 3 в контейнер 7 сбора продукции.

[2]Отчет Отделения сельскохозяйственных наук РАН о выполнении фундаментальных и поисковых научных исследований в 2017 г. М.: ОСХН РАН, 2018. 412 с.

После выполнения вышеописанных действий машина для сбора плодов с кустов томата выполняет последующее движение по рельсовым путям, проложенным в направлении роста томатов, и при их обнаружении алгоритм этих действий повторяется.

Однако использование данной машины на операции извлечения зараженных растений овощных культур и картофеля из почвы является невозможным в виду особенностей движения платформы по рельсовым путям, что в семеноводстве овощных культур и картофеля является недостижимым по причине их возделывания в открытом грунте.

Кроме того, цифровая система идентификации плодов томата не позволяет обеспечить распознавание кустов растений овощных культур и картофеля в виду конструктивного расположения системы технического зрения, обеспечивающего одностороннее распознавание исследуемых биологических объектов – для достоверной идентификации зараженного куста растения картофеля необходимо обеспечить сканирование листа как сверху, так и снизу в потоке поступательного движения.

Компанией IMAG разработан робот-сборщик огурцов в теплице, представленный на рисунке 4 [11]. Технологический процесс автоматизированного сбора плодов огурцов аналогичен сбору томатов, описанному выше, с оригинальной особенностью получения, кроме изображения поверхности плода еще и идентификацию плодоножки с помощью системы технического зрения для среза плода.

Рис. 4. **Общий вид машины IMAG для сбора огурцов с кустов в теплице /**
Fig. 4. **General view of IMAG robot for harvesting cucumbers in the greenhouse**

Основным недостатком данного робота-сборщика огурцов является отсутствие механизма подпорного среза плода и системы его фиксации при перемещении в контейнер сбора с необходимостью корректировки системы технического зрения для определения степени зрелости плода или его поражения с внутренней стороны куста.

В настоящее время российскими и зарубежными учеными проводятся исследования по разработке методов неинвазивного обнаружения заболевания биологических объектов, в том числе с разработкой нейросетевых алгоритмов классификации здоровых и зараженных растений [17, 18, 19], учитывающих генетические особенности биологических объектов [20, 21].

Таким образом, проведенный анализ технических средств по цифровым системам идентификации, сбору биологических объектов свидетельствует об отсутствии машинно-технологических комплексов по автоматизированному удалению зараженных растений овощных культур и картофеля в семеноводстве.

Следовательно, актуальной задачей является разработка технологии, машины для осуществления автоматизированного удаления зараженных биологических объектов с площади учетной делянки, а также рабочего органа, позволяющего осуществлять локальное удаление поражённых заболеваниями растений.

Цель исследований **–** теоретически обосновать процесс сортофитопрочистки в селекционно-семеноводческих посадках картофеля и овощных культур с использованием технологий машинного зрения и элементов роботизации.

Научная новизна – выявлены теоретические закономерности для обоснования инновационной технологии сортофитопрочистки овощных культур и картофеля и определены показатели оценки ее эффективности.

Материал и методы. Исследования проводили на базе ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, г. Москва) в 2022-2023 гг.

Для исследований предложена машина по проведению сортофитопрочисток посадок овощных культур и картофеля, разработанная коллективом авторов статьи в ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (рис. 5).

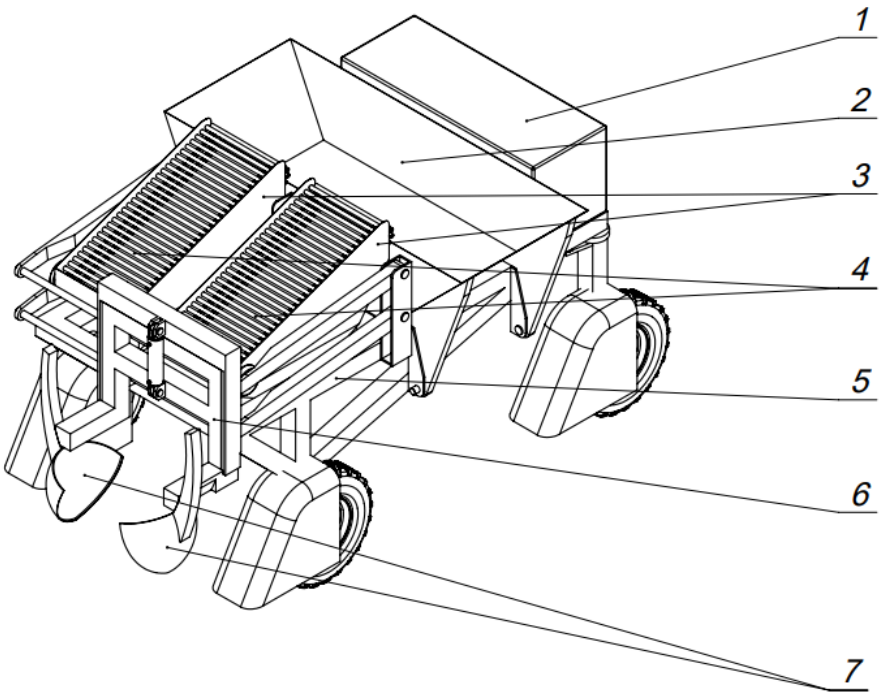

Рис. 5. **Конструктивная схема машины для сортофитопрочистки овощных культур и картофеля: 1 – силовая установка; 2 – саморазгружающийся бункер; 3 – бункер для почвы; 4 – планчатый транспортёр; 5 – рама шасси; 6 – подъемный механизм; 7 – рабочий орган в форме ковшей /**

Fig. 5. **Structural diagram of a machine for variety and phytocleaning of vegetable crops and potatoes: 1 – power plant; 2 – self-unloading bunker; 3 – soil bunker; 4 – slatted conveyor; 5 – chassis frame; 6 – lifting mechanism; 7 – working body in the form of buckets**

Представленная машина состоит из рамы шасси 5, на которой установлен саморазгружающийся бункер для растений 2, бункер для почвы 3 с установленным на нём планчатым транспортёром 4 и рабочими органами 7 для извлечения поражённых растений из почвы вместе с корневой системой и почвой. Рабочий орган может представлять собой два ковша с заострёнными кромками или пару вил.

Принцип работы предлагаемой машины для сортофитопрочистки показан на рисунке 6 и заключается в следующем.

При движении по полю с использованием технологий машинного зрения определяется заражённое растение или растение (рис. 6, а), не соответствующее сортовым признакам. В случае определения подобного растения машина останавливается, при этом рабочий орган должен находиться над растением (рис. 6, б), которое подлежит удалению, после чего с помощью гидроцилиндров происходит заглубление каждого из ковшей (вил) до их полного смыкания, тем самым образуя полусферу (рис. 6, в). Затем рабочий орган извлекается из почвы и поднимается над бункером для почвы, после чего происходит раскрытие ковшей (вил) и содержащаяся в них масса почвы и растения с корневой системой поступает на планчатый транспортер (рис. 6, г), при движении по которому происходит отделение почвы от корневой системы растения (рис. 6, д), при этом почва ссыпается в нижестоящий бункер для почвы, а растения с корневой системой поступают в саморазгружающийся бункер (рис. 6, е). При данной схеме работы грунт, поступивший в бункер для почвы, может быть в нём дополнительно продезинфицирован одним из наиболее актуальных способов, кроме того, образованная лунка после удаления растения может быть отдельно продезинфици-

рована аэрозолем препаратов. После дезинфекции грунта в машине он может быть ссыпан в следующую лунку, образующуюся после извлечения другого растения.

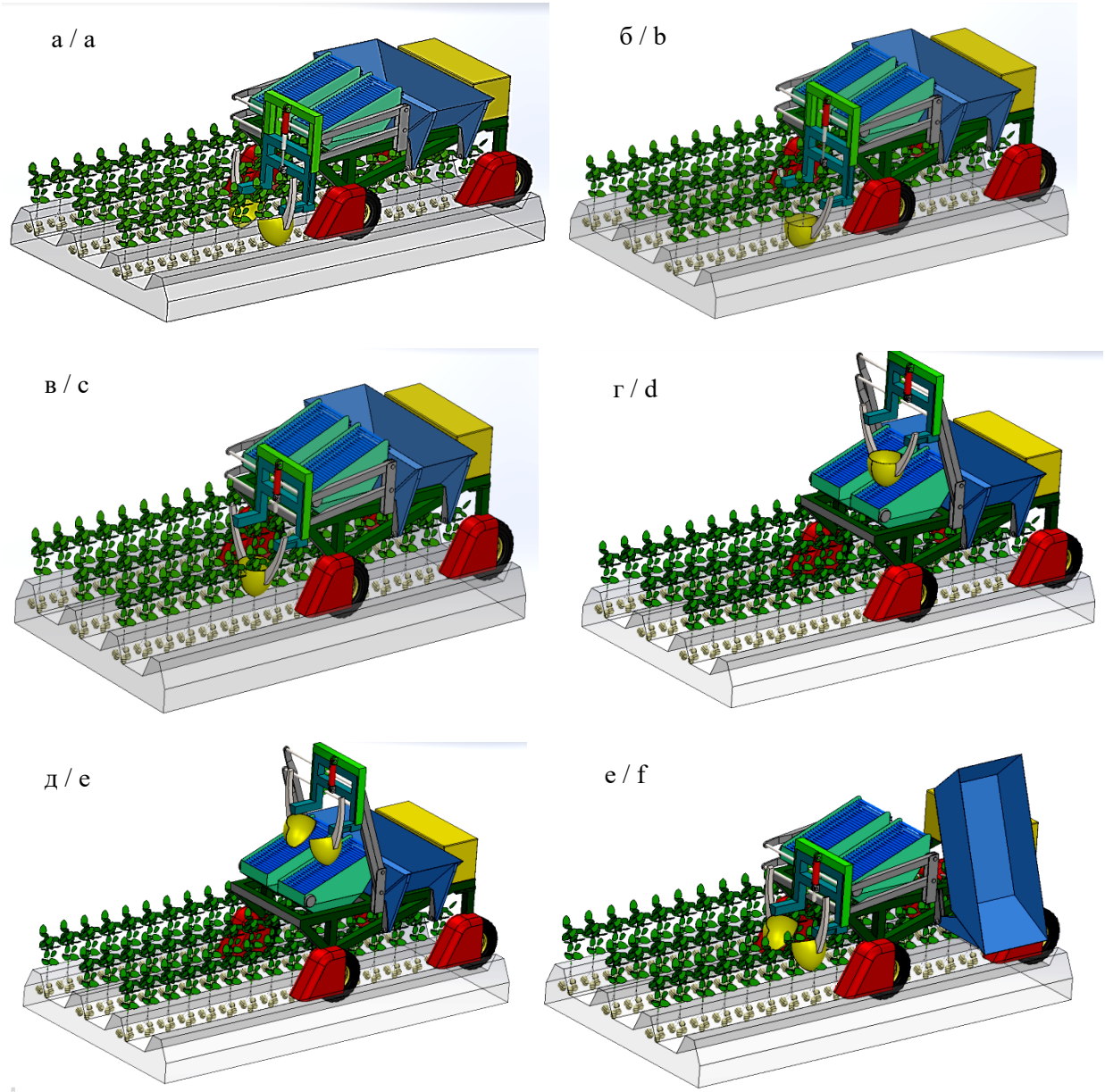

Рис. 6. **Технологическая схема работы машины для сортофитопрочистки овощных культур и картофеля /**
Fig. 6. **Technological scheme of the machine for variety and phytocleaning of vegetable crops and potatoes**

Для исключения подачи переуплотненных почвенных слоев на поверхность съемного бункера необходимо уменьшить глубину подкапывания почвенного пласта (U|П) с сохранением качественных показателей, обеспечивающих минимальную вероятность обрыва надземной части зараженного растения в момент захвата рабочим органом, для чего необходимо воздействовать на физико-механические свойства почвы и состояние внешней среды, в том числе непосредственно на растение (X|i).

Следовательно, необходимо проведение дополнительных исследований как теоретических, так и экспериментальных при разработке соответствующих технологий по удалению зараженных растений овощных культур и картофеля, а также технических средств для их реализации.

Результаты и их обсуждение. Инновационная технология сортофитопрочистки предусматривает:

1) применение средств воздушного мониторинга на базе беспилотного летательного

аппарата (БПЛА) с интерпретацией данных о состоянии системы по экспресс-оценке функционального состояния растений овощных культур и картофеля;

2) передачу полученной информации о нахождении зараженных растений картофеля и овощных культур на площади учетной делянки на блок управления автоматизированного комплекса для сортофитопрочистки, ее движение с последующим извлечением зараженных растений из почвы и дальнейшей их утилизации.

Реализация положений 1 и 2 инновационной технологии сортофитопрочистки предусматривает адаптацию разработанных средств воздушного мониторинга и автоматизированной технологической платформы в соответствии с полученной информацией без выполнения этапов разработки технологических решений вышеуказанных конструкций, необходимо более детально рассмотреть функциональные возможности рабочих органов, обеспечивающих выполнение операций сортофитопрочистки овощных культур и картофеля: определение, извлечение и перемещение зараженных растений овощных культур и картофеля в съемный бункер. Для поиска наиболее максимального числа решений и при последующем выборе из них самого оптимального рассмотрим варианты использования функциональной схемы реализации инновационной технологии сортофитопрочистки овощных культур и картофеля с применением или без использования БПЛА, с качественной оценкой целесообразности повышения работы технических средств в виде морфологической матрицы (табл. 2).

При этом эффективность использования беспилотного летательного аппарата или ее отсутствие определим показателем эффективности $Э_{СП}$ реализации инновационной технологии сортофитопрочистки, который представляет собой совокупность значений, определяющий вес критерия оценки исследуемого технологического процесса:

$$Э_{СП} = 1 - \sum_{n}^{i=1} W_i, \quad (1)$$

где W_i − вектор весов критерия оценки реализации инновационной технологии сортофитопрочистки.

При этом балльная оценка по каждому критерию оценки варьирует в пределах:

$$0 = \leq W_i \leq 0{,}1. \quad (2)$$

Целесообразность реализации инновационной технологии сортофитопрочистки при использовании (БП) и без определяется значением показателя эффективности $Э_{СП}$ по каждому из вариантов:

$$Э_{СП} = 1 - (W_Э + W_A + W_M + W_{ЭН} + W_H + W_{ЭК}), \quad (3)$$

где $W_Э$ – вектор весов экономического критерия оценки реализации инновационной технологии сортофитопрочистки; W_A – вектор весов агротехнического критерия оценки реализации инновационной технологии сортофитопрочистки; W_M − вектор весов критерия материалоемкости оценки реализации инновационной технологии сортофитопрочистки; $W_{ЭН}$ − вектор весов критерия энергоемкости оценки реализации инновационной технологии сортофитопрочистки; W_H − вектор весов критерия надежности оценки реализации инновационной технологии сортофитопрочистки; $W_{ЭК}$ − вектор весов критерия экологичности оценки реализации инновационной технологии сортофитопрочистки.

Эффективность реализации инновационной технологии сортофитопрочистки овощных культур и картофеля с использованием беспилотного летательного аппарата составила:

$$\begin{cases} Э_{СП1} = 1 - (0{,}1 + 0{,}2 + 0{,}2 + 0{,}2 + 0{,}2 + 0{,}1) = 0. \\ Э_{СП2} = 1 - (0{,}1 + 0{,}1 + 0{,}1 + 0{,}1 + 0{,}1 + 0{,}2) = 0{,}3. \end{cases} \quad (4)$$

Согласно системы выражений (4) имеем, что реализация инновационной технологии сортофитопрочистки овощных культур и картофеля более эффективна без применения БПЛА при использовании в конструкции машины оптической системы идентификации зараженных растений, обеспечивающей распознавание некондиционных растений в автоматизированном режиме без визуального контроля селекционера посадок картофеля, от квалификации которого зависит надлежащее выполнение диагностирования. Следовательно, обоснование процессов технологии и параметров технических средств выполняется без использования средств воздушного мониторинга.

Заключение. Наличие современных технологий и машин механизированной технологии в селекции и семеноводстве овощных культур и картофеля не обеспечивает качественное выполнение технологического процесса и требует новых научно обоснованных технических решений. Данные решения должны способствовать снижению или полнейшему исключению антропогенного воздействия на качество работ в селекции и семеноводстве овощных культур и картофеля в соответствии с агротехническими требованиями.

Таблица 2 – **Морфологическая матрица выбора технических средств использования функционирующих элементов реализации инновационной технологии сортофитопрочистки овощных культур и картофеля /**
Table 2 – **Morphological matrix for the selection of technical means for the use of functioning elements for the implementation of innovative technology for cultivar phytocleaning of vegetable crops and potatoes**

Критерий оценки / Criteria for evaluation	*Технические средства использования функционирующих элементов реализации инновационной технологии сортофитопрочистки овощных культур и картофеля / Technical means of using the functioning elements of the implementation of innovative technology of variety and phytocleaning of vegetable crops and potatoes*			
	использование беспилотного летательного аппарата / use of an untanned aerial vehicle	*обоснование / rationale*	*отсутствие беспилотного летательного аппарата / lack of an untanned aerial vehicle*	*обоснование / rationale*
1	2	3	4	5
Экономическая / Economic	-	Затраты на приобретение беспилотного летательного аппарата / The cost of purchasing an unmanned aerial vehicle $W_{Э1}$, $W_{Э1} = 0,1$	+	Отсутствие затрат на приобретение беспилотного летательного аппарата / No cost to purchase an unmanned aerial vehicle $W_{Э2}$, $W_{Э2} = 0$
Агротехническая / Agrotechnical	+	Повышение качества распознавания зараженных растений в виду увеличения в двукратном размере технических средств для распознавания: системы идентификации на беспилотном летательном аппарате (БП) и технологической платформе (ТП) / Improving the quality of recognition of infected plants in view of the doubling of technical means for recognition: identification systems on an unmanned aerial vehicle (UAV) and technological platform (TP), W_{A1}, $W_{A1} = 0,1$: $W_{a1} = 0,1 \cdot 2 = 0,2$	-	Снижение качества распознавания зараженных растений в виду наличия системы идентификации только на технологической платформе (ТП) / Decrease in the quality of recognition of infected plants due to the presence of an identification system only on the technological platform (TP) W_{A2}, $W_{A2} = 0,1$
Металлоемкость / Metal consumption	+	Повышение материалоемкости технических средств в виду наличия БПЛА и двух систем идентификации на беспилотном летательном аппарате (БП) и технологической платформе (ТП) / Increasing the material consumption of technical means due to the presence of a UAV and 2 identification systems on an unmanned aerial vehicle (UAV) and a technological platform (TP), W_{M1}, $W_{M1} = 0,1$:$W_{M1} = 0,1 \cdot 2 = 0,2$	-	Снижение материалоемкости технических средств в виду наличия БПЛА и двух систем идентификации на беспилотном летательном аппарате (БП) и технологической платформе (ТП) / Reducing the material consumption of technical means due to the presence of a UAV and 2 identification systems on an unmanned aerial vehicle (UAV) and a technological platform (TP), W_M, $W_{M2} = 0,1$

Продолжение табл. 2

1	2	3	4	5
Энергоемкость / Energy intensity	+	Повышение энергоемкости технологии в виду наличия технических средств: беспилотного летательного аппарата (БП) и технологической платформы (ТП) / Increasing the energy intensity of the technology due to the availability of technical means: an unmanned aerial vehicle (UAV) and a technological platform (TP), $W_{ЭН1}$, $W_{ЭН1} = 0,1$: $W_{ЭН1} = 0,1 \cdot 2 = 0,2$	+	Снижение энергоемкости технологии в виду наличия одной технологической платформы (ТП) / Reducing the energy intensity of the technology due to the presence of one technological platform (TP) $W_{ЭН2}$, $W_{ЭН2} = 0,1$
Надежность / Reliability	-	Снижение надежности реализации технологии в виду согласования работы технических средств: беспилотного летательного аппарата (БП) и технологической платформы (ТП) / Reducing the reliability of the technology implementation due to the coordination of the operation of technical means: an unmanned aerial vehicle (UAV) and a technological platform (TP): $W_{Н1}$, $W_{Н1} = 0,1$: $W_{Н1} = 0,1 \cdot 2 = 0,2$	-	Повышение надежности реализации технологии в виду согласования работы технических средств: беспилотного летательного аппарата (БП) и технологической платформы (ТП) / Improving the reliability of the implementation of the technology in view of the coordination of the operation of technical means: an unmanned aerial vehicle (UAV) and a technological platform (TP) $W_{Н2}$, $W_{Н2} = 0,1$
Экологичность / Environmental friendliness	+	Снижение экологического воздействия реализации технологии в виду снижения уплотнения почвы, обусловленное отсутствием проходов по учетной делянке технологической платформы (ТП) при идентификации зараженных растений / Reducing the environmental impact of the implementation of the technology in terms of reduced soil compaction due to the lack of passes through the registration plot of the technological platform (TP) when identifying infected plants $W_{ЭК1}$, $W_{ЭК1} = 0,1$	+	Повышение экологического воздействия реализации технологии в виду увеличения уплотнения почвы, обусловленное дополнительными проходами по учетной делянке технологической платформы (ТП) при идентификации зараженных растений / Increased environmental impact of technology implementation due to increased soil compaction due to additional passes on the registration plot of the technological platform (TP) when identifying infected plants $W_{ЭК1}$, $W_{ЭК1} = 0,1$, $W_{ЭК1} = 0,1 \cdot 2 = 0,2$

Примечания: «+» – повышение; «–» – понижение / Notes: «+» – downgrade; «–» – promotion

Разработан показатель эффективности реализации инновационной технологии сортофитопрочистки, учитывающий параметры экономических и агротехнических показателей, а также металлоемкости, энергоемкости, экологичности и надежности.

Выполнено теоретическое обоснование машинной технологии сортофитопрочистки в селекции и семеноводстве овощных культур и картофеля в системе цифрового сельскохозяйственного производства с элементами роботизации, включающее в себя интерпретацию данных о состоянии системы по экспресс-оценке функционального состояния растений, передачу полученной информации о нахождении зараженных растений овощных культур и картофеля на площади учетной делянки на блок управления автоматизированного комплекса для сортофитопрочистки, а также ее движение с извлечением зараженных растений из почвы и дальнейшей их утилизации.

Список литературы

1. Петухов С. Н. Состояние технического и технологического обеспечения селекции и оригинального семеноводства картофеля. Агротехника и энергообеспечение. 2018;(4):76–84.
Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36852656 EDN: YVECCT

2. Пономарев А. Г., Колчин Н. Н., Зернов В. Н., Петухов С. Н. Селекции и семеноводству картофеля необходима механизация. Картофель и овощи. 2017;(3):22–24.
Режим доступа: http://potatoveg.ru/mexanizaciya/selekcii-i-semenovodstvu-kartofelya-neobxodima-mexanizaciya.html

3. Лобачевский Я. П., Дорохов А. С., Сибирев А. В. Современное состояние технологического обеспечения производства овощных культур в Российской Федерации. Овощи России. 2023;(5):5–10.
DOI: https://doi.org/10.18619/2072-9146-2023-5-5-17 EDN: CYLUBG

4. Краснощеков Н. В. Агроинженерная стратегия: от механизации сельского хозяйства к его интеллектуализации. Тракторы и сельхозмашины. 2010;77(8):5–8.
Режим доступа: https://journals.eco-vector.com/0321-4443/article/view/68902/ru_RU#!

5. Симаков Е. А., Анисимов Б. В., Коршунов А. В., Дуркин М. Л. О концепции развития оригинального, элитного и репродукционного семеноводства картофеля в России. Картофель и овощи. 2005;(2):2–5.
Режим доступа: http://potatoveg.ru/wp-content/uploads/2013/03/kio_2_2005v.pdf

6. Федоренко В. Ф., Мишуров Н. П., Неменущая Л. А. Анализ состояния и перспективы развития селекции и семеноводства овощных культур: науч. аналит. обзор. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2019. 96 с.
Режим доступа: https://rosinformagrotech.ru/data/elektronnye-kopii-izdanij/rastenievodstvo/send/5-rastenievodstvo/1396-analiz-sostoyaniya-i-perspektivy-razvitiya-selektsii-i-semenovodstva-ovoshchnykh-kultur-2019

7. Лобачевский Я. П., Ценч Ю. С. Принципы формирования систем машин и технологий для комплексной механизации и автоматизации технологических процессов в растениеводстве. Сельскохозяйственные машины и технологии. 2022;16(4):4–12. DOI: https://doi.org/10.22314/2073-7599-2022-16-4-4-12 EDN: IDJFYV

8. Лачуга Ю. Ф., Измайлов А. Ю., Лобачевский Я. П., Шогенов Ю. Х. Интенсивные машинные технологии, роботизированная техника и цифровые системы для производства основных групп сельскохозяйственной продукции. Техника и оборудование для села. 2018;(7):2–7.

9. Лобачевский Я. П., Дорохов А. С. Цифровые технологии и роботизированные технические средства для сельского хозяйства. Сельскохозяйственные машины и технологии. 2021;15(4):6–10.
DOI: https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10 EDN: YFRZDV

10. Лобачевский Я. П., Бейлис В. М., Ценч Ю. С. Аспекты цифровизации системы технологий и машин. Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2019;(3(36)):40–45.
Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41192528 EDN: RLCDHO

11. Van Henten E. J., Van Tuijl B. A. J., Hemming J., Kornet J. G., Bontsema J., Van Os E. A. Field test of an autonomous cucumber picking robot. Biosystems Engineering. 2003;86(3):305–313.
DOI: https://doi.org/10.1016/J.BIOSYSTEMSENG.2003.08.002

12. Ji C., Feng Q., Yuan T., Li W. Development and performance analysis on cucumber harvesting robot system in greenhouse. Robot. 2011;33(6):726–730. DOI: https://doi.org/10.3724/SP.J.1218.2011.00726

13. Tarrio P., Bernardos A. M., Casar J. R., Besada J. A. A harvesting robot for small fruit in bunches based on 3-D stereoscopic vision. Computers in Agriculture and Natural Resources, 4th World Congress Conference, Florida, 2006. pp. 270–275. URL: https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?JID=1&AID=21885&CID=canr2006&T=1

14. Feng Q., Wang X., Zheng W., Qiu Q., Jiang K. A new strawberry harvesting robot for elevated–trough culture. International Journal of Agricultural and Biological Engeneering. 2012;5(2):1–8.
URL: https://www.ijabe.org/index.php/ijabe/article/view/495

15. Дорохов А. С., Аксенов А. Г., Сибирёв А. В., Мосяков М. А. Аналитические исследования машинно-технологических комплексов для сортофитопрочистки посадок картофеля и овощных культур в селекции и семеноводстве. Аграрный научный журнал. 2022;(4):76–82.
DOI: https://doi.org/10.28983/asj.y2022i4pp76-82 EDN: DHXNNI

16. Feng Q. C., Zou W., Fan P. F., Zhang C. F., Wang X. Design and test of robotic harvesting system for cherry tomato. International Journal of Agricultural and Biological Engeneering. 2018;11(1):96–100.
DOI: https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181101.2853

17. Jin X., Jie L., Wang Sh., Qi H. J., Li Sh. W. Classifying wheat hyperspectral pixels of healthy heads and fusarium head blight disease using a deep neural network in the wild field. Remote Sens. 2018;10(3):395.
DOI: https://doi.org/10.3390/rs10030395

18. Militante S., Gerardo B., Medina R. Sugarcane Disease Recognition using Deep Learning. IEEE Eurasia Conference on IOT, Communication and Engineering (ECICE), 2019. pp. 575–578.
DOI: https://doi.org/10.1109/ECICE47484.2019.8942690

19. Gold K. M., Townsend P. A., Chlus A., Herrmann I., Couture J. J., Larson E. R., Gevens A. J. Hyperspectral Measurements Enable Pre-Symptomatic Detection and Differentiation of Contrasting Physiological Effects of Late Blight and Early Blight in Potato. Remote Sensing. 2020;12(2):286. DOI: https://doi.org/10.3390/rs12020286

20. Zhang W., Zhu Q., Huang M., Guo Ya, Qin J. Detection and Classification of Potato Defects Using Multispectral Imaging System Based on Single Shot Method. Food Analytical Methods. 2019;12:2920–2929.
DOI: https://doi.org/10.1007/s12161-019-01654

21. Solovchenko A. E., Shurygin B. M., Kuzin A. I., Solovchenko O. V., Krylov A. S. Extraction of Quantitative Information from Hyperspectral Reflectance Images for Noninvasive Plant Phenotyping. Russian Journal of Plant Physiology. 2022;69:144. DOI: https://doi.org/10.1134/S1021443722601148

References

1. Petukhov S. N. The state of technical and technological support of breeding and original potato seed production. *Agrotekhnika i energoobespechenie*. 2018;(4):76–84. (In Russ.). URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36852656

2. Ponomarev A. G., Kolchin N. N., Zernov V. N., Petukhov S. N. Mechanization is necessary for breeding and seed growing of potato. *Kartofel' i ovoshchi* = Potato and Vegetables. 2017;(3):22–24. (In Russ.).
URL: http://potatoveg.ru/mexanizaciya/selekcii-i-semenovodstvu-kartofelya-neobxodima-mexanizaciya.html

3. Lobachevskiy Ya. P., Dorokhov A. S., Sibirev A. V. The current state of technological support for vegetable crops production in the Russian Federation. *Ovoshchi Rossii* = Vegetable crops of Russia. 2023;(5):5–10. (In Russ.).
DOI: https://doi.org/10.18619/2072-9146-2023-5-5-17

4. Krasnoshchekov N. V. Agroengineering strategy: from mechanization of agriculture to its intellectualization! *Traktory i sel'khozmashiny*. 2010;77(8):5–8. (In Russ.).
URL: https://journals.eco-vector.com/0321-4443/article/view/68902/ru_RU#!

5. Simakov E. A., Anisimov B. V., Korshunov A. V., Durkin M. L. About development of conception of the original, elite and reproductive potato seeds breeding in Russia. *Kartofel' i ovoshchi* = Potato and Vegetables. 2005;(2):2–5. (In Russ.). URL: http://potatoveg.ru/wp-content/uploads/2013/03/kio_2_2005v.pdf

6. Fedorenko V. F., Mishurov N. P., Nemenushchaya L. A. Analysis of the state and prospects of development of breeding and seed production of vegetable crops: scientific and analytical overview. Mosow: *Rosinformagrotekh*, 2019. 96 p.
URL: https://rosinformagrotech.ru/data/elektronnye-kopii-izdanij/rastenievodstvo/send/5-rastenievodstvo/1396-analiz-sostoyaniya-i-perspektivy-razvitiya-selektsii-i-semenovodstva-ovoshchnykh-kultur-2019

7. Lobachevskiy Ya. P., Tsench Yu. S. Principles of forming machine and technology systems for integrated mechanization and automation of technological processes in crop production. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii* = Agricultural Machinery and Technologies. 2022;16(4):4–12. (In Russ.).
DOI: https://doi.org/10.22314/2073-7599-2022-16-4-4-12

8. Lachuga Yu. F., Izmaylov A. Yu., Lobachevskiy Ya. P., Shogenov Yu. Kh. Intensive machine technologies, robotyzed equipment and digital systems for production of main groups of agricultural products. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela* = Machinery and Equipment for Rural Area. 2018;(7):2–7. (In Russ.).

9. Lobachevskiy Ya. P., Dorokhov A. S. Digital technologies and robotic devices in the agriculture. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii* = Agricultural Machinery and Technologies. 2021;15(4):6–10. (In Russ.).
DOI: https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10

10. Lobachevskiy Ya. P., Beylis V. M., Tsench Yu. S. Digitization aspects of the system of technologies and machines. *Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK*. 2019;(3(36)):40–45. (In Russ.).
URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41192528

11. Van Henten E. J., Van Tuijl B. A. J., Hemming J., Kornet J. G., Bontsema J., Van Os E. A. Field test of an autonomous cucumber picking robot. Biosystems Engineering. 2003;86(3):305–313.
DOI: https://doi.org/10.1016/J.BIOSYSTEMSENG.2003.08.002

12. Ji C., Feng Q., Yuan T., Li W. Development and performance analysis on cucumber harvesting robot system in greenhouse. Robot. 2011;33(6):726–730. DOI: https://doi.org/10.3724/SP.J.1218.2011.00726

13. Tarrio P., Bernardos A. M., Casar J. R., Besada J. A. A harvesting robot for small fruit in bunches based on 3-D stereoscopic vision. Computers in Agriculture and Natural Resources, 4th World Congress Conference, Florida, 2006. pp. 270–275. URL: https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?JID=1&AID=21885&CID=canr2006&T=1

14. Feng Q., Wang X., Zheng W., Qiu Q., Jiang K. A new strawberry harvesting robot for elevated-trough culture. International Journal of Agricultural and Biological Engeneering. 2012;5(2):1–8.
URL: https://www.ijabe.org/index.php/ijabe/article/view/495

15. Dorokhov A. S., Aksenov A. G., Sibirev A. V., Mosyakov M. A. Analytical studies of machine-technological complexes for variety-phytocleaning of potato and vegetable crops in breeding and seed production. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal* = The Agrarian Scientific Journal. 2022;(4):76–82. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.28983/asj.y2022i4pp76-82

16. Feng Q. C., Zou W., Fan P. F., Zhang C. F., Wang X. Design and test of robotic harvesting system for cherry tomato. International Journal of Agricultural and Biological Engeneering. 2018;11(1):96–100. DOI: https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181101.2853

17. Jin X., Jie L., Wang Sh., Qi H. J., Li Sh. W. Classifying wheat hyperspectral pixels of healthy heads and fusarium head blight disease using a deep neural network in the wild field. Remote Sens. 2018;10(3):395. DOI: https://doi.org/10.3390/rs10030395

18. Militante S., Gerardo B., Medina R. Sugarcane Disease Recognition using Deep Learning. IEEE Eurasia Conference on IOT, Communication and Engineering (ECICE), 2019. pp. 575–578. DOI: https://doi.org/10.1109/ECICE47484.2019.8942690

19. Gold K. M., Townsend P. A., Chlus A., Herrmann I., Couture J. J., Larson E. R., Gevens A. J. Hyperspectral Measurements Enable Pre-Symptomatic Detection and Differentiation of Contrasting Physiological Effects of Late Blight and Early Blight in Potato. Remote Sensing. 2020;12(2):286. DOI: https://doi.org/10.3390/rs12020286

20. Zhang W., Zhu Q., Huang M., Guo Ya, Qin J. Detection and Classification of Potato Defects Using Multispectral Imaging System Based on Single Shot Method. Food Analytical Methods. 2019;12:2920–2929. DOI: https://doi.org/10.1007/s12161-019-01654

21. Solovchenko A. E., Shurygin B. M., Kuzin A. I., Solovchenko O. V., Krylov A. S. Extraction of Quantitative Information from Hyperspectral Reflectance Images for Noninvasive Plant Phenotyping. Russian Journal of Plant Physiology. 2022;69:144. DOI: https://doi.org/10.1134/S1021443722601148

Сведения об авторах

✉ **Дорохов Алексей Семенович**, доктор техн. наук, академик РАН, зам. директора по научно-организационной работе, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», д. 5, 1-й Институтский проезд, г. Москва, Российская Федерация, 109428, e-mail: vim@vim.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4758-3843**

Аксенов Александр Геннадьевич, доктор техн. наук, главный научный сотрудник отдела технологий и машин в овощеводстве, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», д. 5, 1-й Институтский проезд, г. Москва, Российская Федерация, 109428, e-mail: vim@vim.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9546-7695**

Сибирёв Алексей Викторович, доктор техн. наук, профессор РАН, главный научный сотрудник отдела технологий и машин в овощеводстве, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», д. 5, 1-й Институтский проезд, г. Москва, Российская Федерация, 109428, e-mail: vim@vim.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9442-2276**, e-mail: sibirev2011@yandex.ru

Мосяков Максим Александрович, кандидат техн. наук, старший научный сотрудник отдела технологий и машин в овощеводстве, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», д. 5, 1-й Институтский проезд, г. Москва, Российская Федерация, 109428, e-mail: vim@vim.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5151-7312**

Сазонов Николай Викторович, кандидат техн. наук, старший научный сотрудник отдела технологий и машин в овощеводстве, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», д. 5, 1-й Институтский проезд, г. Москва, Российская Федерация, 109428, e-mail: vim@vim.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4899-9197**

Information about the authors

✉ **Aleksey S. Dorokhov,** DSc in Engineering, academician of the Russian Academy of Sciences, Deputy Director for Scientific and Organizational Work, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 5, 1st Institutskiy proezd, Moscow, Russian Federation, 109428, e-mail: vim@vim.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4758-3843**

Alexander G. Aksenov, DSc in Engineering, chief researcher, the Department of Technologies and Machines in Vegetable Growing, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 5, 1st Institutskiy proezd, Moscow, Russian Federation, 109428, e-mail: vim@vim.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9546-7695**

Aleksey V. Sibirev, DSc in Engineering, professor of the Russian Academy of Sciences, chief researcher, the Department of Technologies and Machines in Vegetable Growing, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 5, 1st Institutskiy proezd, Moscow, Russian Federation, 109428, e-mail: vim@vim.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9442-2276**, e-mail: sibirev2011@yandex.ru

Maksim A. Mosyakov, PhD in Engineering, senior researcher, the Department of Technologies and Machines in Vegetable Growing, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 5, 1st Institutskiy proezd, Moscow, Russian Federation, 109428, e-mail: vim@vim.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5151-7312**

Nikolai V. Sazonov, PhD in Engineering, senior researcher, the Department of Technologies and Machines in Vegetable Growing, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 5, 1st Institutskiy proezd, Moscow, Russian Federation, 109428, e-mail: vim@vim.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4899-9197**

✉ – Для контактов / Corresponding author

https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.1.112-122
УДК 62-838

(cc) BY

Математическое моделирование динамических процессов сельскохозяйственного мобильного энергетического средства на электроприводе

© 2024. З. А. Годжаев ✉, С. Е. Сенькевич, И. С. Алексеев, Е. Н. Ильченко
ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», г. Москва, Российская Федерация

В статье рассмотрены вопросы моделирования процессов работы сельскохозяйственного мобильного энергетического средства (МЭС) с электроприводом (ЭП). Исследования выполнены в период 2022-2023 гг. Проведен обзор современной литературы по рассматриваемой проблеме, включая вопросы по моделированию функциональных свойств мобильных машин и улучшению показателей качества работы МЭС. Представлены математическая модель движения МЭС с электродвигателем, а также описание применяемого метода и последовательность действий для проведения исследований. Выполнены предварительные теоретические исследования движения при разных режимах работы. Предлагаемая модель удобна для реализации и расчёта в любом из прикладных программных продуктов, поддерживающих моделирование динамических систем с электромеханическим приводом. Предложенная модель, решение которой выполнено на основе методов численного интегрирования систем в программной среде Matlab Simulink, позволила смоделировать динамические процессы в электромеханической силовой передаче МЭС при выполнении различных сельскохозяйственных операций. С помощью представленной модели был проведен анализ электромеханических процессов в переходных и установившихся режимах работы, а также динамических процессов в силовой передаче. Получены графики изменения исследуемых параметров силовой передачи МЭС и определены упругие моменты в соединениях пятимассовой расчетной схемы. Применение модели позволяет отследить изменение характеристик, при отклонении условий опыта. Модель показала свою работоспособность при выполнении имитации сельскохозяйственных операций (внесение удобрений, культивация, посев) и ее можно использовать на стадии проектирования для исследования характеристик динамических процессов силовых передач МЭС малого класса тяги с электромеханическим приводом. При разных параметрах модели наблюдали изменения математического ожидания угловой скорости ЭД с 147,89 до 156,87 рад/с и скорости движения МЭС от 4,51 до 4,79 м/с.

Ключевые слова: *мобильное энергосредство, сельскохозяйственные операции, имитационная модель, процесс движения, моменты инерции, жесткость*

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (тема № FGUN-2022-0009).
Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

***Для цитирования*:** Годжаев З. А., Сенькевич С. Е., Алексеев И. С., Ильченко Е. Н. Математическое и имитационное моделирование динамических процессов сельскохозяйственного мобильного энергетического средства на электроприводе. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2024;25(1):112–122. DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.1.112-122

Поступила: 24.04.2023 Принята к публикации: 16.01.2024 Опубликована онлайн: 28.02.2024

Mathematical modeling of dynamic processes of agricultural mobile energy vehicles on an electric drive

© 2024. Zakhid A. Godzhaev ✉, Sergey E. Senkevich, Ilya S. Alekseev, Ekaterina N. Ilchenko
Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

The article considers the issues of modeling the processes of agricultural mobile energy vehicles (MEV) with electric drive (ED). A review of modern literature on the problem under study as well as questions on modeling the functional properties of mobile machines and improving the quality indicators of MEV work are presented. A mathematical model of the motion of the MEV with an electric motor is presented, as well as a description of the method used and a sequence of actions for conducting research. Preliminary theoretical studies of motion in different modes of operation have been carried out. The proposed model is convenient for implementation and calculation in any of the applied software products that support the modeling of dynamic systems with an electromechanical drive. The proposed model, the solution of which is based on the methods of numerical integration of systems in the Matlab Simulink software environment, made it possible to simulate the dynamic processes of electromechanical power transmission of MEV during various agricultural operations. With the help of this model, the analysis of electromechanical processes in transient and steady-state operating modes, as well as dynamic processes in the power transmission were carried out. Graphs of changes in the studied parameters of the MEV power transmission are obtained and elastic moments in the joints of the 5-mass design scheme are determined. The use of the model allows you to track the change in statistical characteristics when the conditions of the experiment change. The model has shown its operability when performing simulation of agricultural operations: fertilization, cultivation and sowing, and it can be used at the design stage to study the characteristics of dynamic processes of small-class traction MEV power transmissions with an electromechanical drive. With

different parameters of the model, there is a change in the mathematical expectation of the angular velocity of the ED from 147.89 to 156.87 rad/s, a change in the mathematical expectation of the speed of the MES from 4.51 to 4.79 m/s.

Keywords: *mobile energy vehicles, agricultural operations, simulation modeling, process of motion, moments of inertial motion, stiffness*

Acknowledgments: the research was carried out under the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM (theme No. FGUN-2022-0009).

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

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

For citation: Godzhaev Z. A., Senkevich S. E., Alekseev I. S., Ilchenko E. N. Mathematical modeling of dynamic processes of agricultural mobile energy vehicles on an electric drive. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2024;25(1):112–122. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.1.112-122

Received: 24.04.2023 Accepted for publication: 16.01.2024 Published online: 28.02.2024

В современных условиях для модернизации мобильного энергетического средства (МЭС) сельскохозяйственного назначения необходима оптимизация конструктивных параметров под современные требования к функциональным и эксплуатационным характеристикам. В связи с этим также нужен переход к новым энергетическим установкам. Одним из перспективных направлений в этом плане является применение электропривода (ЭП). Так как МЭС малого класса тяги повсеместно распространены в нашей стране, нахождение оптимального решения для создания ЭП на базе конструкции таких машин является выполнимой, и весьма актуальной задачей [1]. Для выполнения этой задачи необходимо изучить свойства электрических машин в реальных условиях работы в сельскохозяйственных операциях. В исследуемой силовой передаче в качестве тягового двигателя применяется асинхронный двигатель (АД). Электромеханические и динамические характеристики АД удобно исследовать с помощью математического и имитационного моделирования, которое с применением современной аппаратно-программной базы позволяет достоверно осуществить решение поставленной задачи [2].

Также необходимо изучить ряд современных подходов, относительно разработки имитационных моделей динамических процессов МЭС в различных условиях эксплуатации. Для этого был проведен анализ публикаций, включающий в себя, в том числе, зарубежные источники. Рассмотрены проблемы и возможные пути их решения в области управляемости и устойчивости МЭС на ЭП с применением математического и имитационного моделирования.

В работе [3] предложена математическая модель, представляющая поведение при обычном боковом опрокидывании электрического трактора с возможностью изменения геометрии, инерции трактора и граничных условий окружающей среды. В исследовании [4] были созданы прямолинейные динамические модели и динамические модели рулевого управления для описания динамического поведения процесса опрокидывания трактора. Был получен энергетический индикатор устойчивости трактора, который использовался для определения угла поворота рулевого колеса для поддержания устойчивости. Исследования в работе [5] посвящены динамическим характеристикам и усталостной надежности трактора большой мощности. Авторы представили полный экспериментальный процесс, который включает выбор цифрового модуля сбора данных, расположение датчиков, обработку данных и так далее. В статье [6] разрабатывается эффективная интегрированная стратегия управления отслеживанием траектории тягача с прицепом, который страдает от недоступных состояний системы и неопределенных помех для практической реализации.

С применением математического и имитационного моделирования изучаются проблемы функционирования и эксплуатационные свойства МЭС с ЭП. В статье [7] разработана динамическая модель трактора для исследования влияния скорости движения вперед, учитывающая уклон рельефа и коэффициент трения колеса с грунтом. Также рассматривается боковая устойчивость трактора при наличии нарушения равновесия. В работе [8] представлен прототип трактора мощностью 9 кВт, состоящий из двух трехфазных асинхронных двигателей, двух независимых инверторов и свинцово-кислотного аккумуляторного блока. Исследование [9] посвящено разработке имитационной модели электрического полноприводного трактора класса 120 кВт в процессе вождения. Результаты показали, что емкость батареи несколько мала для работы с плугом, и производительность такого трактора может быть улучшена

за счет оптимизации аккумуляторных батарей. В работе [10] представлена система управления приводом электродвигателя трактора, подходящая для характеристики работы трактора на основе бесщеточного двигателя постоянного тока. В работе [11] авторы поставили цель – представить новую деформируемую модель местности/грунта, способную работать в реальном времени, которая может взаимодействовать с механикой модели много массовой системы и динамикой модели гидравлики. Представленная авторами имитационная модель трактора в реальном времени может быть использована при разработке продукта и в других производственных процессах.

Важным вопросом является регулирование выходных характеристик электродвигателя при работе в различных режимах. Возможное решение представлено в исследовании «Управление питанием с помощью нечеткой логики для электрифицированных мобильных машин» [12]. Рассматривается проблема интеллектуального управления мощностью двигателя для устойчивой работы с использованием обратной связи ЭП. Основное внимание уделяется обеспечению стабильной работы, агрегатируемого с МЭС сельхозмашин. Это достигается за счет динамической регулировки запаса хода энергоустановки в соответствии с требованиями к мощности и скоростью их изменения. Для количественной оценки требований к мощности предлагается супервизорной подход, основанный на теории нечеткой логики. Использование данного решения действительно способно повысить стабильность и надежность автоматической системы регулирования.

Метод имитационного моделирования позволяет решать задачи исследования сложных динамических систем. Моделируется система, которая может одновременно содержать элементы непрерывного и дискретного действия, быть подверженной влиянию многочисленных детерминированных и случайных факторов. Для анализа системы приходится многократно моделировать процесс ее функционирования, варьируя исходными данными модели. Моделирование процессов представляет собой весьма актуальный вопрос. Решение поставленного вопроса с помощью программного пакета Matlab Simulink [13], который приобрел широкое применение во всех отраслях науки, достаточно просто и удобно.

Цель исследований – разработка математической модели для определения характеристик динамических процессов силовых передач МЭС тягового класса 0,6 на ЭП.

Научная новизна – модель динамических процессов, описывающая крутильно-колебательную систему макетного образца МЭС с ЭП, включающая физические характеристики электрических и механических компонентов силовой передачи МЭС.

Материал и методы. Эффективным способом получения характеристик динамических процессов в ЭП – математическое и компьютерное моделирование[1, 2]. В связи с этим необходимо постоянное совершенствование аппаратно-программного обеспечения вычислительных средств для реализации расчетов по имитационному моделированию. Для выполнения расчетов необходимы достоверные исходные данные – масса и габаритные характеристики МЭС, упругодемпфирующие свойства валопровода силовой передачи и внешние возмущения. В настоящей статье использовали программный пакет Matlab Simulink как средство реализации имитационного моделирования электромеханических систем.

Результаты и их обсуждение. Эффективным способом получения картины динамических процессов в ЭП, исследования режимов работы МЭС является математическое и компьютерное моделирование [14].

Для составления математической модели был разработан упрощённый эскиз МЭС, который представлен на рисунке 1.

Эквивалентная схема динамической модели МЭС приведена на рисунке 2.

Модель МЭС характеризует следующие параметры: J_1 – приведенный момент инерции АД, Н·м·с^2; J_2 – момент инерции всех вращающихся деталей КПП и дифференциала, Н·м·с^2; J_3 – момент инерции бортового редуктора и дисков ведущих колес трактора, Н·м·с^2; J_4 – момент инерции шин ведущих колес, Н·м·с^2; φ_1 – угол вращения вала ротора АД, рад; φ_2 – угол вращения деталей КПП и дифференциала, рад;

[1]Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин: учеб. для студентов электротехн. и энергет. специальностей вузов. М.: Высшая школа, 2001. 327 с.

[2]Тарасик В. П. Математическое моделирование технических систем: учебник для вузов. Минск: ДизайнПРО, 2004. 640 с. Режим доступа: https://djvu.online/file/v8X4ui3aayQmz

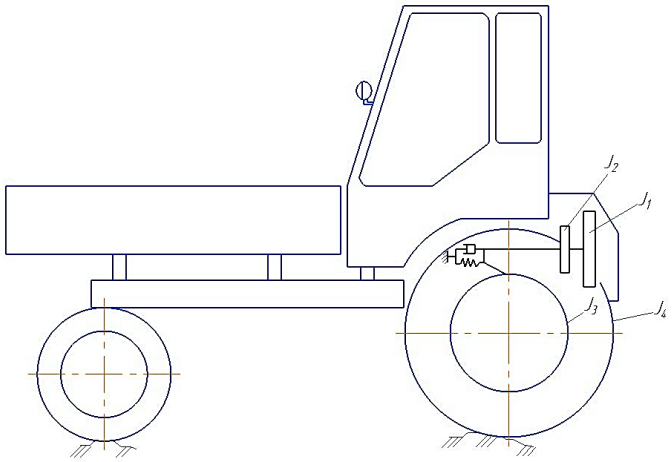

Рис. 1. **Упрощенный эскиз МЭС /**
Fig. 1. **Simplified sketch of the MEV**

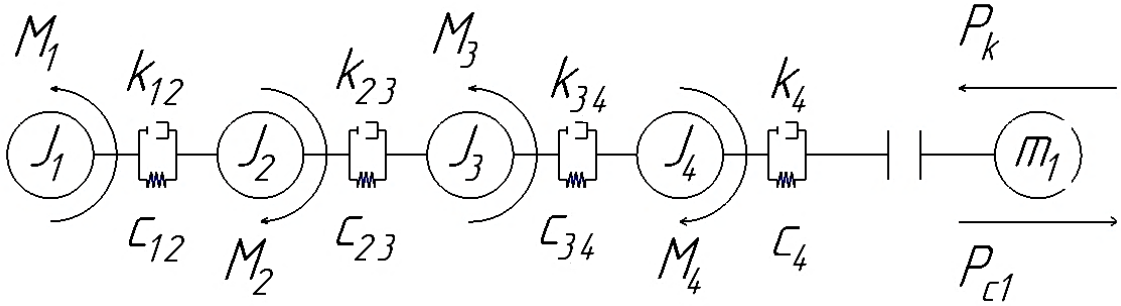

Рис. 2. **Эквивалентная схема динамической модели МЭС /**
Fig. 2. **The equivalent scheme of the dynamic model of MEV**

φ_3 – угол вращения дисков ведущих колес трактора, рад; φ_4 – угол вращения шины ведущего колеса, рад; ω_1 – угловая скорость вала электродвигателя, рад/с; ω_2 – угловая скорость деталей КПП и дифференциала, рад/с; ω_3 – угловая скорость дисков ведущих колес трактора, рад/с; ω_4 – угловая скорость шин ведущих колес трактора, рад/с; m_1 – поступательно-движущаяся масса трактора, кг; υ_1 – линейная скорость трактора, м/с; c_{12} и k_{12} – жесткость и коэффициент демпфирования валопровода КПП соответственно [Н·м/рад] и [Н·м с/рад]; c_{23} и k_{23} – жесткость и коэффициент демпфирования соответственно главной передачи и дифференциала, [Н·м/рад] и [Н·м с/рад]; c_{34} и k_{34} – крутильная жесткость и коэффициент демпфирования бортового редуктора [Н·м/рад] и [Н·м с/рад]; c_4 и k_4 – крутильная жесткость и коэффициент демпфирования шин ведущих колес трактора, [Н·м/рад] и [Н·м с/рад]; R_{m1} – вертикальная сила реакции ведущих колес МЭС, Н; $P_{op.m}$ – амплитуда силы сопротивления на крюке трактора, Н; P_k – касательная сила колеса трактора, Н; P_{c1} – сила сопротивления от сельскохозяйственного орудия, Н; a_{m1} – смещение вертикальных реакций $R_{м1}$ относительно оси ведущих колес трактора, м; $\lambda_{s.m1}$ – продольная деформация шин ведущих колес, м; r_1 – динамический радиус качения ведущего колеса, м; M_1 – момент на валу АД, Н·м; M_2 – момент, приложенный к валопроводу силовой передачи, Н·м; M_3 – крутящий момент дисков ведущих колес трактора, Н·м; M_4 – крутящий момент шин ведущих колес трактора, Н·м; $M_к$ – моменты касательных сил взаимодействия ведущих колес трактора с почвой, Н·м; $M_{эм}$ – электромагнитный момент, создаваемый АД, Н·м; $M_с$ – момент сопротивления на валу ротора АД, Н·м.

Приняты следующие обозначения: u – напряжение, В; I – сила тока, А; t – время, сек; ω_r – механическая частота вращения ротора, рад/с; p – число пар полюсов; a, β, γ – обозначают принадлежность к соответствующей фазе. Нижний индекс s означает принадлежность к статору, индекс r к ротору.

Уравнение движения для вала АД:

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J}(M_{эм} - M_с), \qquad (1)$$

где J – момент инерции масс, вращающихся на валу ротора.

В общем случае можно записать так:

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J}\left(M_{эм} - M_c\,(t, \omega_r, \Theta_r)\right) = \frac{M_{дин}}{J} \quad (2)$$

где $M_{дин}$ – динамический момент на валу АД.

Уравнение электромагнитного момента АД имеет вид [15]:

$$M_{эм} = M_1 = p\frac{\sqrt{3}}{2}L\left[\left(I_{sa}I_{r\gamma} + I_{s\beta}I_{ra} + I_{s\gamma}I_{r\beta}\right) - \right.$$
$$\left. - \left(I_{sa}I_{r\beta} + I_{s\beta}I_{r\gamma} + I_{s\gamma}I_{ra}\right)\right], \quad (3)$$

где L – взаимная индуктивность фазы обмоток ротора и статора АД при совпадении их осей или индуктивность обмотки статора от основного магнитного потока.

Взаимная индуктивность обмоток АД определяется:

$$L = (2/3)L_\mu, \quad (4)$$

где L_μ – полная индуктивность фазы обмотки статора от основного магнитного потока, учитывающая наличие токов в других фазах.

Движение вращающихся деталей общей части трансмиссии и ведущего моста описывается уравнением моментов:

$$J_2\frac{d\omega_2}{dt} = M_2 - M_3, \quad (5)$$

$$M_2 = c_{12}(\varphi_1 - i_2\cdot\varphi_2) + \\ + k_{12}\left(\frac{d\varphi_1}{dt} - i_2\cdot\frac{d\varphi_2}{dt}\right), \quad (6)$$

$$M_3 = c_{23}(\varphi_2 - i_3\cdot\varphi_3) + \\ + k_{23}\left(\frac{d\varphi_2}{dt} - i_3\cdot\frac{d\varphi_3}{dt}\right). \quad (7)$$

Движение ведущих колес трактора описывается системой уравнений:

$$J_3\frac{d\omega_3}{dt} = M_3 - M_4. \quad (8)$$

$$M_4 = c_{34}(\varphi_3 - \varphi_4) + k_{34}\left(\frac{d\varphi_3}{dt} - \frac{d\varphi_4}{dt}\right), \quad (9)$$

$$J_4\frac{d\omega_4}{dt} = M_4 - M_k. \quad (10)$$

Моменты касательных сил взаимодействия ведущих колес трактора с почвой можно выразить через моменты, обусловленные упругостью и демпфированием в шинах:

$$M_k = \left(c_4\lambda_{s.m1} + k_4\frac{d\lambda_{s.m1}}{dt}\right)\cdot r_1 + a_{m1}R_{m1}. \quad (11)$$

Уравнение движения центра МЭС можно описать зависимостью:

$$m_1\frac{dv_1}{dt} = P_k - P_{c1}. \quad (12)$$

При движении трактора без прицепного сельскохозяйственного орудия $P_{c1} = 0$.

Для движения трактора вместе с прицепным сельскохозяйственным орудием сила P_{c1} зависит от изменения силы тягового сопротивления и изменения микропрофиля дороги:

$$P_{c1} = P_{op.m}\cdot\cos(2\pi f_c t), \quad (13)$$

где f_c – частота колебаний тяговой нагрузки на крюке трактора.

Продольная деформация шин ведущих колес зависит от величины толкающей силы, которая в свою очередь зависит от крутящего момента (рис. 3) [16].

Следовательно, после преобразования, учитывая буксование колес, получим выражение:

$$\frac{d\lambda_{s.m1}}{dt} = \omega_4 r_1\left(1 - \frac{\lambda_{s.m1}}{r_1}\right) - \frac{v_1}{(1-\delta)}. \quad (14)$$

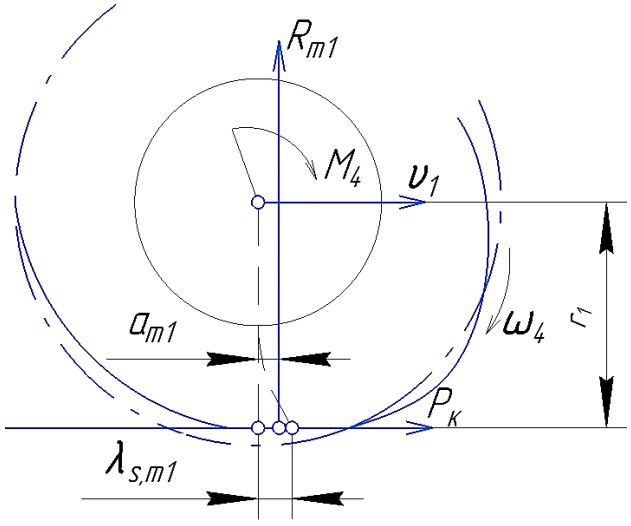

Рис. 3. **Схема качения колеса в продольном направлении /**
Fig. 3. **The scheme of rolling the wheel in the longitudinal direction**

Согласно динамической модели (рис. 2), система дифференциальных уравнений движения серийного МЭС имеет вид:

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J}\left(p\frac{\sqrt{3}}{2}L\left[\left(I_{sa}I_{r\gamma} + I_{s\beta}I_{ra} + I_{s\gamma}I_{r\beta}\right) - \left(I_{sa}I_{r\beta} + I_{s\beta}I_{r\gamma} + I_{s\gamma}I_{ra}\right)\right] - \right.$$
$$\left. - c_{12}\left(\varphi_1 - i_2\cdot\varphi_2\right) - k_{12}\left(\frac{d\varphi_1}{dt} - i_2\cdot\frac{d\varphi_2}{dt}\right)\right), \quad (15)$$

$$J_2\frac{d\omega_2}{dt} = c_{12}(\varphi_1 - i_2\cdot\varphi_2) + k_{12}\left(\frac{d\varphi_1}{dt} - i_2\cdot\frac{d\varphi_2}{dt}\right) -$$
$$-\left(c_{23}(\varphi_2 - i_3\cdot\varphi_3) + k_{23}\left(\frac{d\varphi_2}{dt} - i_3\cdot\frac{d\varphi_3}{dt}\right)\right), \quad (16)$$

$$J_3\frac{d\omega_3}{dt} = c_{23}(\varphi_2 - i_3\cdot\varphi_3) + k_{23}\left(\frac{d\varphi_2}{dt} - i_3\cdot\frac{d\varphi_3}{dt}\right) -$$
$$-\left(c_{34}(\varphi_3 - \varphi_4) + k_{34}\left(\frac{d\varphi_3}{dt} - \frac{d\varphi_4}{dt}\right)\right), \quad (17)$$

$$J_4\frac{d\omega_4}{dt} = c_{34}(\varphi_3 - \varphi_4) + k_{34}\left(\frac{d\varphi_3}{dt} - \frac{d\varphi_4}{dt}\right) - \left(\left(c_4\lambda_{s.m1} + k_4\frac{d\lambda_{s.m1}}{dt}\right)\cdot r_1 + a_{m1}R_{m1}\right), \quad (18)$$

$$m_1\frac{dv_1}{dt} = \frac{\left(c_4\lambda_{s.m1} + k_4\frac{d\lambda_{s.m1}}{dt}\right)\cdot r_1 + a_{m1}R_{m1}}{r_1} - P_{c1}, \quad (19)$$

$$\frac{d\lambda_{s.m1}}{dt} = \omega_4 r_1\left(1 - \frac{\lambda_{s.m1}}{r_1}\right) - \frac{v_1}{(1-\delta)}. \quad (20)$$

Динамические процессы силовой передачи МЭС описываются вышеприведёнными уравнениями. Решение математической модели методами численного интегрирования и линеаризации системы дифференциальных уравнений подробно описано в работе [15]. В динамической колебательной системе «АД-Механическая часть силовой передачи-Колесо-Грунт» нами приняты следующие обозначения: R_{m1} – вертикальная сила реакции на колесах МЭС, Н:

$$R_{m1} = 0{,}82\cdot G_{\text{ТР}}, \quad (21)$$

где $G_{\text{ТР}}$, – вес трактора, Н; a_{m1} – смещение вертикальных реакций R_{m1} относительно оси ведущих колес трактора:

$$a_{m1} = a_{0.m1} + \lambda_{m1}, \quad (22)$$

$$a_{0.m1} = f_1 r_1, \quad (23)$$

где f_1 – коэффициент сопротивления перекатыванию.

Передаточные отношения механической части силовой передачи, согласно кинематической схеме (рис. 4), приведены в таблице 1.

Таблица 1 – **Значения передаточных отношений силовой передачи /**
Table 1 – **Power transmission ratio values** /

Наименование узла / Name of the unit	*Передаточные отношения / Gear ratios*
Коробка перемены передач (1-я передача) / Gearbox (1st gear), $i_{\text{кпп}} = i_{\text{кпп1}} \times i_{\text{кпп2}}$	2,927
Главная передача и дифференциал / Main gear and Differential, $i_{\text{диф}}$	4,05
Бортовой редуктор / On-board reductor, $i_{\text{БР}}$	5,83

Передаточные отношения i_2 и i_3 (1-я передача) определяются:

$$i_2 = i_{\text{кпп1}} \times i_{\text{кпп2}} \times i_{\text{диф}} = \frac{Z_9}{Z_{10}} \times \frac{Z_{15}}{Z_{14}} \times \frac{Z_{26}}{Z_{19}} = \frac{26}{23} \times \frac{23}{36} \times \frac{77}{19} = 2{,}927,$$

$$i_3 = i_{\text{БР}} = \frac{Z_{23}}{Z_{22}} = \frac{70}{12} = 5{,}83.$$

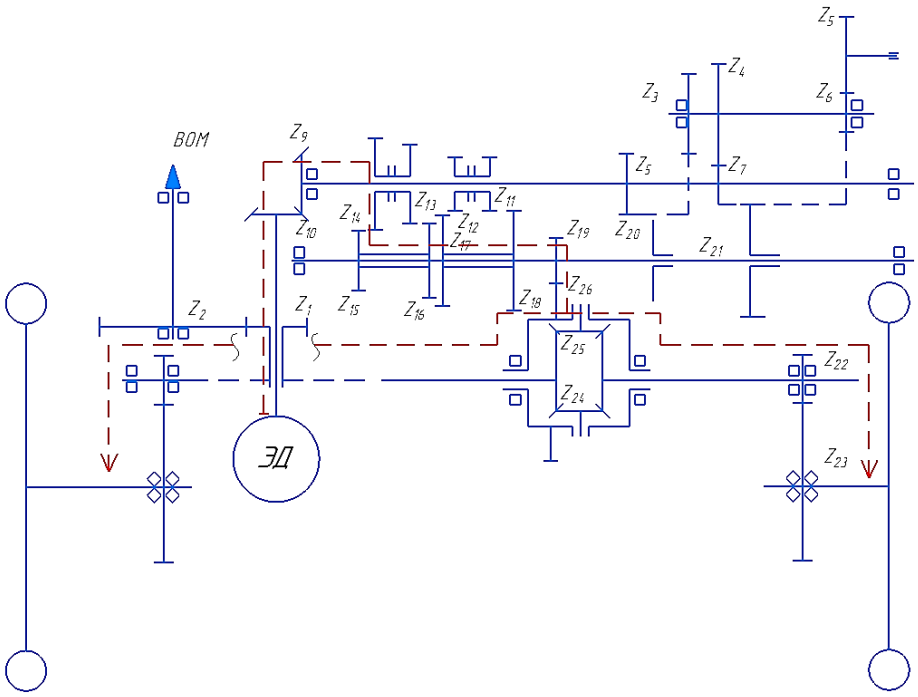

Рис. 4. **Кинематическая схема силовой передачи МЭС /**
Fig. 4. **Kinematic scheme of power transmission of MEV**

Описанная система уравнений позволяет проводить ряд теоретических экспериментов. Для этого была создана имитационная модель в среде Matlab Simulink (рис. 5).

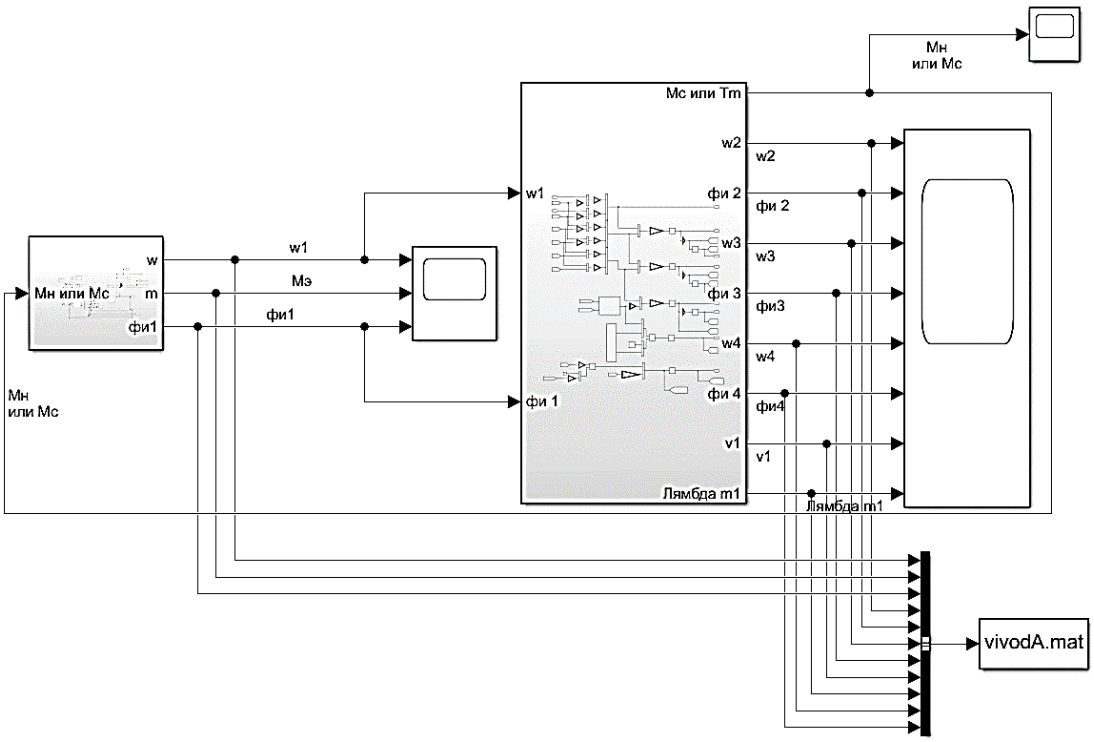

Рис. 5. **Имитационная модель силовой передачи МЭС в среде Matlab Simulink /**
Fig. 5. **Simulation model of power transmission of MEV in Matlab Simulink environment**

Исходные данные для решения системы уравнений (15)-(20) представлены в таблице 2 [17, 18].

Имитационное моделирование работы трактора проведено при различных условиях, подсистема которых была внесена в модель и представлена на рисунке 6. Для удобства проведения расчетов в подсистему, через функцию switch-case включены все виды экспериментов, а также работа трактора без нагрузки.

Таблица 2 – **Собственные значения параметров колебательной системы силовой передачи МЭС /**
Table 2 – **Eigenvalues of the parameters of the oscillatory power transmission system of MEV**

Параметр / Parameter	*Значение / Value*	*Единица измерения / Unit of measurement*
c_{12}	512000	Н·м/рад / N·m/rad
c_{23}	112000	Н·м/рад / N·m/rad
c_{34}	1200000	Н·м/рад / N·m/rad
c_4	507000	Н/м / N/m
k_{12}	0,01	Н·м·с/рад / N·m·s/rad
k_{23}	0,05	Н·м·с/рад / N·m·s/rad
k_{34}	0,0002	Н·м·с/рад / N·m·s/rad
k_4	1,0	Н·с/м / N·s/m
J_1	1,7	кг·м^2 / kg·m^2
J_2	0,14	кг·м^2 / kg·m^2
J_3	16,4	кг·м^2 / kg·m^2
J_4	8,87	кг·м^2 / kg·m^2
i_2	2,927	-
i_3	5,83	-
$P_{op.m}$	940; 1210; 2190; 4100;	Н / N
r_1	0,579	м / m
m_1	От 1450 до 1985 / From 1450 to 1985	кг / kg
δ	0,1	-
f_1	0,035; 0,1; 0,17; 0,18	-
p	2	-

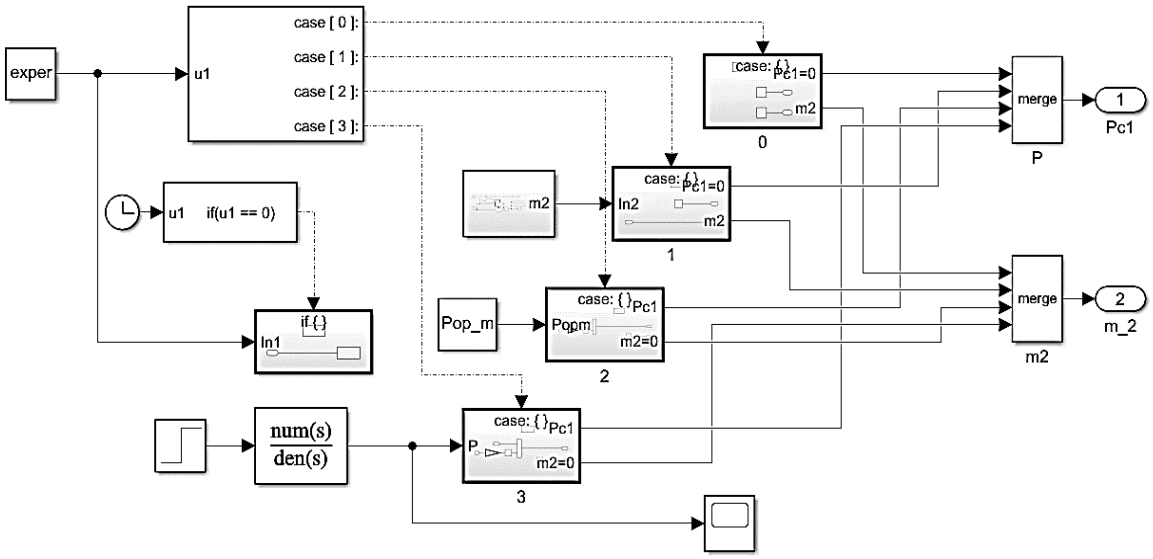

Рис. 6. **Подсистема для проведения теоретических расчётов-экспериментов /**
Fig. 6. **Subsystem for carrying out theoretical calculations-experiments**

Для выбора режима работы модели необходимо прописать в переменной exper цифру от 0 до 3, где:

0 – работа трактора без нагрузки в режиме холостого хода-проезда;

1 – работа трактора при имитации внесения удобрений;

2 – работа трактора при имитации работы с культиватором (воздействия тяговой нагрузки с частотой f_c = 3 Гц),

3 – работа трактора при имитации работы с технологической платформой (воздействия тяговой нагрузки, которая была получена в результате экспериментов).

В модели, помимо теоретических данных, использованы значения, полученные во время экспериментов. Данные тяговой нагрузки обработаны с помощью приложения System Identification в программной среде Matlab Simulink, в результате чего получена передаточная функция. Эта функция была внесена в модель с помощью блока Transfer Fcn, который моделирует линейную систему передаточной функции переменной в области Лапласа.

В результате моделирования были получены теоретические данные основных параметров, которые характеризуют работу моделируемой МЭС. График угловой скорости ведущих колес представлен на рисунке 7. Анализ данных графика наглядно демонстрирует нарастание угловой скорости ведущих колёс до установившегося режима.

График линейной скорости трактора представлен на рисунке 8. Анализ данных графика показывает увеличение линейной скорости до установившейся величины за одниковый промежуток времени с предыдущим параметром.

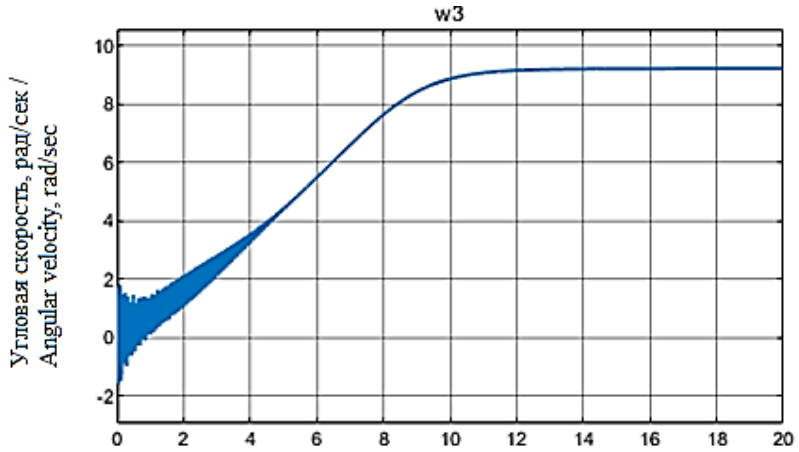

Рис. 7. **Угловая скорость ведущих колес /**
Fig. 7. **Angular velocity of the driving wheels**

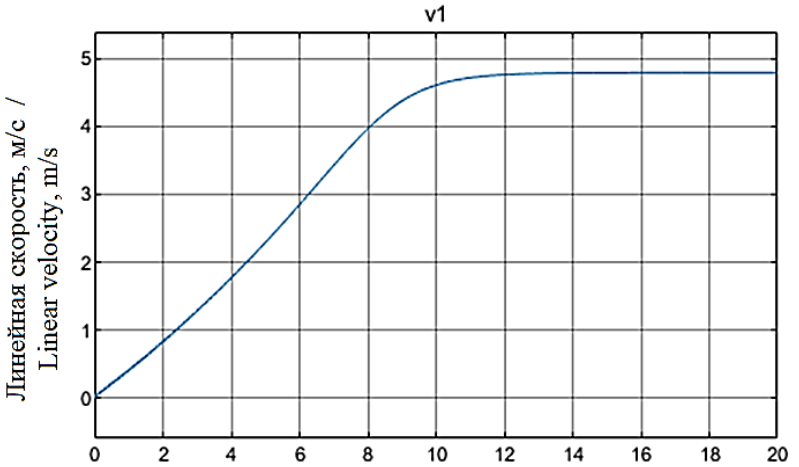

Рис. 8. **Линейная скорость трактора /**
Fig. 8. **Linear velocity of the driving wheels**

График фазных токов электродвигателя трактора, представленный на рисунке 9, демонстрирует изменение фазных токов электродвигателя. Изменение силы тока трех фаз пропорционально нарастанию угловой скорости колеса и линейной скорости трактора до установившейся величины за аналогичный промежуток времени, что свидетельствует о согласованности параметров модели.

Расчетные данные представляют собой большой объём чисел, изменяющихся во времени параметров (некоторые из которых представлены в табл. 3). При дальнейшей работе с помощью этих данных можно рассчитать математическое ожидание, дисперсию и среднеквадратическое отклонение по каждому из параметров.

Применение методов моделирования динамических процессов позволило провести расчеты характеристик колебаний электромеханической силовой передачи МЭС, определить упругие моменты и перемещения в соединениях колебательной системы. Система дифференциальных уравнений, описывающих динамическую нагруженность силовой передачи, включает электрические и механические процессы, а также содержит нелинейные пара-

метры – упругодемпфирующие характеристики шин, характеристики электродинамических компонентов и коэффициент сцепления колеса с почвой при наличии буксования.

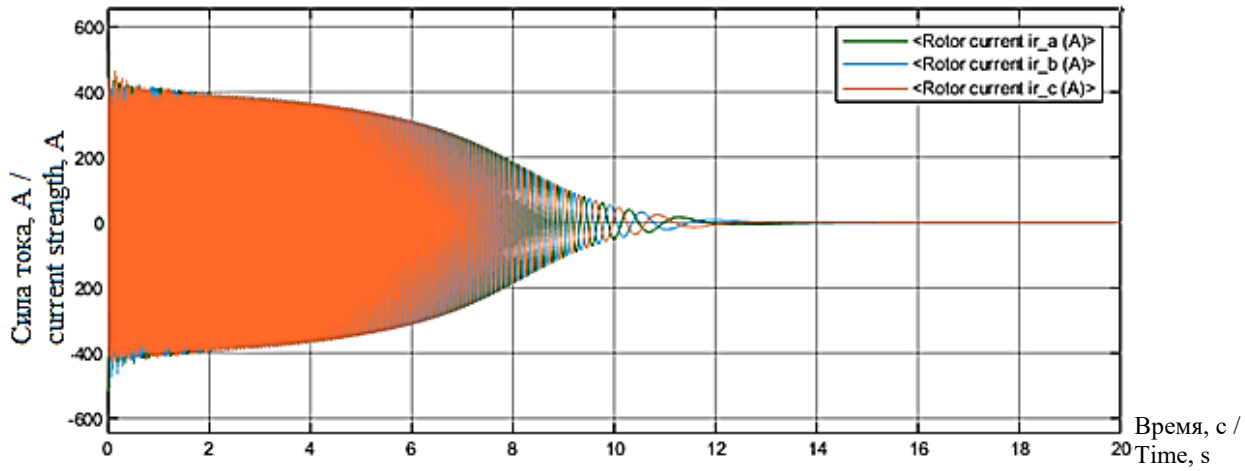

Рис. 9. **Изменение силы тока трех фаз электродвигателя** /
Fig. 9. **Changing the current strength of the three phases of the electric motor**

Таблица 3 – **Результаты обработки рассчитанных значений модели /**
Table 3 – **Results of processing the calculated values of the model**

Параметр / Parameter	*№ опыта / No. of the Experiment*	
	0	*1*
ω_1, рад/с / rad/s	156,87	147,89
ω_2, рад/с / rad/s	53,60	50,53
ω_3, рад/с / rad/s	9,19	8,67
ω_4, рад/с / rad/s	9,19	8,67
υ_1, м/с / m/s	4,79	4,51

Выводы. 1. Разработанная имитационная модель позволяет определить основные характеристики, а также провести количественный и качественный анализ электрической и механической частей силовой передачи МЭС – процессы изменения токов статора и ротора, электромагнитных сил и упругих моментов в соединениях, частоты вращения валов в переходных и установившемся режимах.

2. Модель показала свою работоспособность при выполнении имитации сельскохозяйственных операций: внесение удобрений, культивация и посев.

3. При разных параметрах модели наблюдается изменение математического ожидания угловой скорости ЭД с 147,89 до 156,87 рад/с, изменение математического ожидания угловой скорости первичного вала КПП от 50,53 до 53,60 рад/с, изменение математического ожидания скорости движения МЭС от 4,51 до 4,79 м/с.

4. Модель позволит на стадии проектирования проводить исследования характеристик динамических процессов силовых передач МЭС подобного класса с электромеханическим приводом.

References

1. Годжаев З. А., Сенькевич С. Е., Кузьмин В. А. Перспективные проекты по созданию роботизированных мобильных энергетических средств сельскохозяйственного назначения. Материалы XII мультиконференции по проблемам управления (МКПУ-2019): мат-лы XII мультиконференции. В четырех томах. Дивноморское, Геленджик: Изд-во Южного федерального университета, 2019. Т. 2. С. 127–129. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41848052 EDN: YXYDVI

Godzhaev Z. A., Senkevich S. E., Kuzmin V. A. Promising projects for the creation of robotic mobile power tools for agricultural purposes. Materials of the XII multi-conference on management problems (MKPU-2019): materials of the XII multiconference in four volumes. Divnomorskoe, Gelendzhik: *Izd-vo Yuzhnogo federal'nogo universiteta*, 2019. Vol. 2. pp. 127–129. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41848052

2. Senkevich S., Duryagina V., Kravchenko V., Gamolina I., Pavkin D. Improvement of the Numerical Simulation of the Machine-Tractor Unit Functioning with an Elastic-Damping Mechanism in the Tractor Transmission of a Small Class of Traction (14 kN). International Conference on Intelligent Computing & Optimization. 2020;1072:204–213. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-33585-4_20

3. Franceschetti B., Lenain R., Rondelli V. Comparison between a rollover tractor dynamic model and actual lateral tests. Biosystems Engineering, 2014;127:79–91. DOI: https://doi.org/10.1016/J.BIOSYSTEMSENG.2014.08.010

4. Qin J., Zhu Zh., Ji H., Zhu Zhong., Li Zh., Du Yu., Song Zh., Mao E. Simulation of active steering control for the prevention of tractor dynamic rollover on random road surfaces. Biosystems Engineering. 2019;185:135–149. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.02.006

5. Li B., Yuan H. Research on dynamic characteristics and reliability of a new heavy duty tractor. Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing. 2019;13(1):JAMDSM0010. DOI: https://doi.org/10.1299/jamdsm.2019jamdsm0010

6. Hou X., Yue M., Zhao J., Zhang X. An ESO-based integrated trajectory tracking control for tractor–trailer vehicles with various constraints and physical limitations. International Journal of Systems Science. 2018;49(15):3202–3215. DOI: https://doi.org/10.1080/00207721.2018.1535100

7. Ahmadi I. Dynamics of tractor lateral overturn on slopes under the influence of position disturbances (model development). Journal of Terramechanics. 2011;48(5):339–346. DOI: https://doi.org/10.1016/J.JTERRA.2011.07.001

8. Melo R. R., Antunes F. L. M., Daher S., Vogt H. H., Albiero D., Tofoli F. L. Novel conception of an electric propulsion system for a 9-kW electric tractor suitable to family farming. IET Electric Power Applications. 2019;13(12):1993–2004. DOI: https://doi.org/10.1049/iet-epa.2019.0353

9. Baek S.-Y., Kim Y.-S., Kim W.-S., Baek S.-M., Kim Y.-J. Development and Verification of a Simulation Model for 120 kW Class Electric AWD (All-Wheel-Drive) Tractor during Driving Operation. Energies. 2020;13(10):2422. DOI: https://doi.org/10.3390/en13102422

10. Chen Y., Xie B., Mao E. Electric Tractor Motor Drive Control Based on FPGA. IFAC-PapersOnLine. 2016;49(16):271–276. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.10.050

11. Jaiswal S., Korkealaakso P., Aman R., Sopanen J., Mikkola A. Deformable Terrain Model for the Real-Time Multibody Simulation of a Tractor With a Hydraulically Driven Front-Loader. IEEE Access. 2019;7:172694–172708. DOI: https://doi.org/10.1109/access.2019.2956164

12. Osinenko P., Geißler M., Herlitzius T. Fuzzy-logic assisted power management for electrified mobile machinery. Neurocomputing. 2015;170:439–447. DOI: https://doi.org/10.1016/j.neucom.2015.04.095

13. Godzhaev Z., Senkevich S., Kuzmin V., Melikov I. Use of the Neural Network Controller of Sprung Mass to Reduce Vibrations From Road Irregularities. Research Advancements in Smart Technology, Optimization, and Renewable Energy. IGI Global, 2021. pp. 423–463. DOI: https://doi.org/10.4018/978-1-7998-3970-5.ch005

14. Godzhaev Z., Senkevich S., Kuzmin V., Ilchenko E., Chaplygin M., Alekseev I., Prilukov A. Simulation of the dynamic processes of a low-capacity combine harvester movement. Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering 2019 (TPACEE 2019). 2020;164:06009. DOI: https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016406009

15. Пустоветов М. Ю., Солтус К. П., Синявский И. В. Компьютерное моделирование асинхронных двигателей и трансформаторов. Примеры взаимодействия с силовыми электронными преобразователями: монография. Германия, Saarbrucken: LAP LAMBERT, 2013. 209 с. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20797893 EDN: RNDDDP

Pustovetov M. Yu., Soltus K. P., Sinyavskiy I. V. Computer modelling of induction motors and transformators. Examples of interaction with power electronic converters: monograph. Germaniya, Saarbrucken: LAP LAMBERT, 2013. 209 p. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20797893

16. Динамика системы дорога-шина-автомобиль-водитель. Под ред. А. А. Хачатурова. М.: Машиностроение, 1976. 535 с.

Dynamics of the road-tire-car-driver system. *Pod red. A. A. Khachaturova*. Moscow: *Mashinostroenie*, 1976. 535 p.

17. Cremer L., Heckl M. Structure-borne sound: structural vibrations and sound radiation at audio frequencies. Springer Science & Business Media, 2013. 573 p.

18. Adams V., Askenazi A. Building better products with finite element analysis. Cengage Learning, 1999. 587 p.

Сведения об авторах

✉ **Годжаев Захид Адыгезалович,** доктор техн. наук, профессор, член-корреспондент РАН, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», 1-й Институтский проезд, дом 5, г. Москва, Российская Федерация, 109428, e-mail: vim@vim.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1665-3730**, e-mail: fic51@mail.ru

Сенькевич Сергей Евгеньевич, кандидат техн. наук, доцент, старший научный сотрудник, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», 1-й Институтский проезд, дом 5, г. Москва, Российская Федерация, 109428, e-mail: vim@vim.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6354-7220**

Алексеев Илья Сергеевич, инженер, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», 1-й Институтский проезд, дом 5, г. Москва, Российская Федерация, 109428, e-mail: vim@vim.ru, **ORCID: https://orcid.org/0009-0005-5169-895X**

Ильченко Екатерина Николаевна, инженер, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», 1-й Институтский проезд, дом 5, г. Москва, Российская Федерация, 109428, e-mail: vim@vim.ru

Information about the authors

✉ **Zakhid A. Godzhaev,** DSc in Engineering, corresponding member of RAS, professor, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 1st Institutskiy proezd, 5, Moscow, Russian Federation, 109428, e-mail: vim@vim.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1665-3730**, e-mail: fic51@mail.ru

Sergey E. Senkevich, PhD in Engineering, associate professor, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 1st Institutskiy proezd, 5, Moscow, Russian Federation, 109428, e-mail: vim@vim.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6354-7220**

Ilya S. Alekseev, engineer, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 1st Institutskiy proezd, 5, Moscow, Russian Federation, 109428, e-mail: vim@vim.ru, **ORCID: https://orcid.org/0009-0005-5169-895X**

Ekaterina N. Ilchenko, engineer, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 1st Institutskiy proezd, 5, Moscow, Russian Federation, 109428, e-mail: vim@vim.ru

✉ – Для контактов / Corresponding author

https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.1.123-133
УДК 631.3

(cc) BY

Результаты исследований шнекового дозатора сухих сыпучих компонентов комбикорма

© 2024. С. Ю. Булатов ✉, А. Н. Пронин
ГБОУ ВО «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет», г. Княгинино, Российская Федерация

При производстве комбикормов необходимо точное соблюдение рецептуры в момент ввода всех необходимых компонентов, для чего применяют различные типы дозаторов. В настоящее время широкое распространение получили автоматические системы, обеспечивающие повышение точности дозирования. Однако для каждого компонента необходимы индивидуальные настройки работы таких систем, что усложняет работу операторов. В статье представлено описание конструкции технического устройства, содержащего основной и дополнительный шнек и позволяющего взвешивать компоненты с разными физико-механическими свойствами при одних и тех же настроечных параметрах. Дано краткое описание рабочего процесса дозатора, перечислены факторы исследования и критерии оценки его работы. Определяли влияние пяти факторов уставки частоты дозаторов n_1, уставки упреждения досыпки m, уставки включения скорости досыпки t, уставки частоты дозаторов n_2, заданной массы навески M_Z на точность дозирования. На первом этапе находили влияние исследуемых факторов при дозировании зерна. Для этого был реализован план Бокса-Бенкина для пяти факторов. В результате анализа полученных данных построена модель регрессии, на основании которой определены три комбинации значений факторов, при которых погрешность дозирования зерна дополнительным шнеком дозатора равна 0. На следующем этапе исследований определяли точность дозирования мела и соли при установленных комбинациях. Выявлено, что дозирование соли осуществляется по закономерности, близкой к кривой по зерну, а погрешность дозирования находится в допустимых пределах 5 %. В результате проведенных исследований выявлена наилучшая комбинация факторов, при которой погрешность дозирования не превышает допустимое значение при взвешивании зерна, соли и мела: n_1 = 30,3 Гц, t = 11,9 %; n_2 = 40,9 % от n_1 (12,42 Гц), M_Z = 202,8 г. При данных значениях исследуемых параметров можно проводить дозирование компонентов с допустимой погрешностью массой навески более 200 г.

Ключевые слова: *лабораторная установка, мел, модель регрессии, план эксперимента, погрешность дозирования, соль*

Благодарности: работа выполнена в рамках договора на проведение научно-исследовательской работы между ГБОУ ВО «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет» и ООО «ДОЗА-АГРО» (тема «Исследование и совершенствование рабочего процесса смесителя сухих сыпучих компонентов СЛГ-2А и модуля макродозирования ММД-1,5×4»).

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

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

***Для цитирования**:* Булатов С. Ю., Пронин А. Н. Результаты исследований шнекового дозатора сухих сыпучих компонентов комбикорма. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2024;25(1):123–133.
DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.1.123-133

Поступила: 15.09.2023 Принята к публикации: 12.01.2024 Опубликована онлайн: 28.02.2024

Research results of the screw dispenser of dry bulk feed components

© 2024. Sergey Yu. Bulatov✉ , Alexey N. Pronin
Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics, Knyaginino, Russian Federation

In the production of compound feeds, it is necessary to follow the recipe at the time of introducing all the necessary components, for which various types of dispensers are used. Currently, automatic dosing systems are widely used, providing increased dosing accuracy. However, individual settings of such systems are required for each component, which makes the work of operators harder. The article describes the design of a technical device containing a main and an additional screw and allowing components with different physical and mechanical properties to be weighed at the same tuning parameters. A brief description of the dispenser's workflow is given, the research factors and criteria for evaluating its work are listed. The influence of five factors was determined: the frequency setpoint of the dispensers n_1, the pre-filling setpoint m, the setpoint for switching on the filling speed t, the frequency setpoint of the dispensers n_2, the set weight of the suspension M_Z on the dosing accuracy. At the first stage, the influence of the studied factors on grain dosing was determined. To do this, the Box-Benkin plan was implemented for five factors. As a result of the analysis of the data obtained, a regression model was built, on the basis of which three combinations of factor values were determined, in which the grain dosing error by an additional dispenser screw was 0. At the next stage of the research, the accuracy of dosing chalk and salt was determined at the established combinations. It was revealed that salt dosing was carried out according to a pattern close to the grain curve, and the dosing error was within the permissible limits of 5%. As a result of the conducted studies, the best combination of factors was determined, in which the dosing error did not exceed the permissible value when weighing grain, salt and chalk: n_1 = 30.3 Hz,

***t* = 11.9 %; n_2 = 40.9 % of n_1 (12.42 Hz), M_Z = 202.8 g. With these values of the studied parameters, it is possible to dose components with the permissible error of the weight of the suspension is over 200 g.**

Keywords: *laboratory setup, chalk, regression model, experimental plan, dosing error, salts*

Acknowledgements: the work was performed within the framework of a research agreement between the Nizhny Novgorod State Engineering and Economics University and DOZA-AGRO LLC (topic "Research and improvement of the workflow of the mixer of dry bulk components SLG-2A and the MMD-1.5×4 macrodosing module").

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*:* Bulatov S. Y., Pronin A. N. Research results of the screw dispenser of dry bulk feed components. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2024;25(1):123–133. (In Russ.).
DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.1.123-133

Received: 15.09.2023 Accepted for publication: 12.01.2024 Published online: 28.02.2024

Обеспечение населения страны продукцией аграрного сектора является общегосударственной задачей. При этом большое внимание уделяется отрасли животноводства, где в последние годы наблюдается рост производства, в частности мяса птицы [1]. В режиме интенсивного ведения мясного производства особое внимание уделяется сбалансированности кормов [2]. Значительную роль в рационе сельскохозяйственных животных и птицы играют комбикорма. Ввиду сложившихся неблагоприятных международно-политических условий, главная задача комбикормовой отрасли – обеспечить импортозамещение в данной промышленности и не допустить удорожания комбикормов, премиксов и кормовых добавок, что может повлиять на рост цен сельскохозяйственных продуктов питания для жителей страны. Отечественные комбикорма, судя по результатам исследований, не только не уступают импортным, но и по некоторым показателям превосходят их [3, 4].

В процессе производства комбикормов важным является точное соблюдение рецептуры при внесении всех необходимых компонентов, для чего применяют различные типы дозаторов [5]. В силу универсальности дозирования компонентов с разными физико-механическими свойствами, простоты, надежности, относительной дешевизны, возможности расположения в составе технологической линии при производстве кормов рационально использование шнековых дозаторов [6]. Выделяют два вида шнеков: закрытые и открытые (или U-образные) [7]. U-образный шнековый конвейер удобен при перемещении тяжелых и связных материалов, но обладает низкой скоростью перемещения [8]. В закрытых шнеках скорость перемещения материалов значительно выше, следовательно, данный тип обладает более высокой пропускной способностью [7]. Несмотря на достаточную изученность работы шнековых машин, исследования в этом направлении остаются актуальными и на сегодняшний день. Исследования направлены на изучение параметров шнеков как на энергетические и количественные характеристики, так и на степень повреждения перемещаемого материала. Так, например, Р. Хевко и др. (R. Hevko et al.) установили оптимальную частоту вращения шнека, при которой наблюдается минимальное повреждение материала – 550…650 мин$^{-1}$ [9]. Т. О. Оланреваджу, И. М. Иеремия и П. Э. Ониеанула (T. O. Olanrewaju, I. M. Jeremiah and P. E. Onyeanula) установили оптимальный угол наклона шнека при транспортировании гранулированных материалов влажностью 13 % [10]. О. Озбек (O. Ozbek) по критериям пропускной способности и энергозатратам, применив методологию нечеткой логики, определил оптимальные параметры шнека: частоту вращения n = 450 мин$^{-1}$, шаг 100 мм, угол наклона 15° [11]. Развитие компьютерных технологий позволило разработать новые методы исследований. М. Пезо и др. (M. Pezo et al.) использовали возможности искусственной нейронной сети, что позволило им разработать модель перемещения частиц в пяти типах горизонтальных шнеков различной длины [12]. З. Янг и др. (Z. Yang et al.) на основе метода DEM создали модель осевого перемещения частицы в вертикальном шнеке, работоспособность которой подтвердили экспериментально [13]. С помощью цифровых технологий Л. Сан и др. (L. Sun et al.) определили влияние угла осевого наклона лопасти шнека на пропускную способность, выявив, что он должен быть на 5 % больше, чем у лопасти винта без осевого угла наклона, и составлять 15° [14].

Российские ученые определили основные физико-механические свойства компонентов комбикорма и установили, что их разнообразие, а также зависимость физико-механических

свойств компонентов от параметров окружающего воздуха существенно влияют на работу дозирующих устройств [15, 16].

В настоящее время широкое распространение получили автоматические системы дозирования, благодаря которым повышается точность дозирования [17]. Однако, как показали исследования, для каждого компонента необходимы индивидуальные настройки работы таких систем, которые могут содержать большое количество настроечных параметров [18]. Всё это усложняет работу операторов. В связи с этим предложено технические устройство и программа управления им, с помощью которых возможно дозирование компонентов с разными физико-механическими свойствами при одних и тех же настроечных параметрах работы [19].

Несмотря на разработку новых технологий, дозирование компонентов остается неотъемлемой операцией [20, 21]

Цель исследования – поиск оптимальных параметров работы шнекового дозатора при дозировании компонентов с разными физико-механическими свойствами.

Научная новизна – разработан дозатор сухих сыпучих компонентов, способный проводить дозирование различных компонентов комбикорма с допустимой погрешностью.

Материал и методы. Исследования проводили в лаборатории «Системы гигиенизации и переработки зерна (кормовых смесей), производства гранулированных кормов» ГБОУ ВО «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет» в течение 2023 года. Шнековый дозатор сухих сыпучих компонентов (рис. 1) состоит из расположенного в корпусе 1 основного шнека 2, привод которого осуществляется электродвигателем 3. Со стороны электродвигателя 3 в верхней части корпуса 1 смонтирован приемный бункер 4, с противоположной стороны от него в нижней части корпуса 1 выполнен выгрузной патрубок 5. Также в нижней части корпуса 1 перед выгрузным патрубком 5 параллельно шнеку 2 смонтирован шнек точного дозирования 6, расположенный в корпусе 7, а его выгрузной патрубок корпуса 7 объединён с выгрузным патрубком основного шнека 5. Привод шнека 6 точного дозирования осуществляется электродвигателем 8 с противоположной стороны от выгрузного патрубка 5. Со стороны электродвигателя 8 в верхней части корпуса 7 смонтирован загрузочный бункер 9 шнека 6, конструктивно связывающий корпусы 1 и 7 шнеков 2 и 6, при этом вал шнека 6 проходит через стенку бункера 7 точного дозирования и вращается электродвигателем 8. Данное устройство предназначено для дозированной подачи сухих сыпучих компонентов и может быть установлено в технологической линии по производству комбикормов.

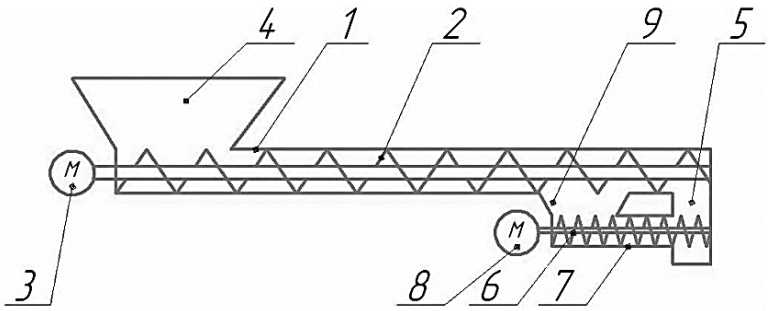

Рис. 1. **Конструктивно-технологическая схема шнекового дозатора сухих сыпучих компонентов: 1, 7 – корпусы; 2 – основной шнек; 3, 8 – электродвигатели; 4 – приемный бункер; 5 – выгрузной патрубок; 6 – шнек точного дозирования; 9 – загрузочный бункер /**

Fig. 1. **Design and technological scheme of the screw dispenser of dry bulk components: 1, 7 - housing; 2 – main auger; 3, 8 – electric motor; 4 – receiving hopper; 5 – discharge pipe; 6 – precise dosing auger; 9 – loading hopper**

Проведенные ранее исследования показали, что шнековыми дозаторами ДШ-60 и ДШ-100 достаточно точно можно осуществить дозирование отдельных компонентов массой не менее 1000 г [18]. Но для этого необходимо подбирать параметры работы дозатора для каждого компонента. Принцип работы предлагаемого дозатора заключается в том, что основная масса дозируемого компонента подается основным шнеком 2, а оставшаяся незначительная часть – дополнительным 6, от работы которого зависит точность дозирования. Поэтому

были определены режимы работы дополнительного шнека 6, при которых обеспечивается точное дозирование компонентов с разными физико-механическими свойствами.

Исследование рабочего процесса шнекового дозатора проводили методами планирования эксперимента. Для этого изготовили лабораторный образец дозатора ДШ-60 на базе шнека с диаметром 60 мм (рис. 2).

а /a ***б / b*** ***в / c***

Рис. 2. **Лабораторная установка дозатора сыпучих компонентов: *а* – общий вид; *б* – шкаф управления; *в* – рабочий орган /**

Fig. 2. **General view of the laboratory installation of the dispenser of bulk components: *a* – general view; *b* – control cabinet; *c* – working body**

С целью получения регрессионной модели реализовали план Бокса-Бенкена для пяти факторов: n_1 – уставки частоты дозаторов (Гц); m – уставки упреждения досыпки (г); t – уставки включения скорости досыпки (%); n_2 – уставки частоты дозаторов (%); M_Z – заданная масса навески (г) [18, 19]. Так как дозатор осуществляет дозирование сначала с высокой частотой вращения n_1 шнека, а в конце дозирования переключается на меньшую частоту n_2 с целью снижения погрешности, то уставка частоты дозаторов n_2 не может быть больше n_1. Поэтому принято решение выражать данный фактор в процентном отношении от n_1. Работоспособность дозатора оценивали относительной погрешностью взвешивания δ, выраженную в процентах. Каждый опыт проводили в трёхкратной повторности и рассчитывали среднее значение фактической массы навески M_F. Планирование эксперимента проводили при дозировании зерна ячменя. Далее при полученных данных проводили исследование на других компонентах, отличающихся физико-механическими свойствами. Значения параметров физико-механических свойств этих компонентов находятся в пределах значений параметров соли и мела, поэтому при проведении исследований выбраны именно эти компоненты.

Результаты и их обсуждение. Результаты исследований работы дозатора приведены в таблице 1.

С помощью полученных данных в программе Statgraphics построена модель регрессии в закодированном виде при уровне достоверности 95 %:

$$y = 3{,}736 + 11{,}744x_1 - 16{,}113x_2 + 11{,}106x_3 + 14{,}619x_4 - 12{,}531x_5 - 8{,}85x_1x_5 + 13{,}375x_2x_5 + 8{,}073x_3^2 - 8{,}575x_3x_4 - 12{,}1x_3x_5 + 9{,}289x_4^2 + 8{,}805x_5^2. \quad (1)$$

Таблица 1 – **Матрица плана Бокса-Бенкина и результаты исследований дозатора сыпучих компонентов /**
Table 1 – **The matrix of the Box-Benkin plan and the results of research on the dispenser of bulk components**

№ опыта / Experiment number	Фактор / Factor					Фактическая масса навески M_F, г / The actual weight of the attachment M_F, g				Относительная погрешность взвешивания δ, % / The relative error of weighing δ, %
						повторность / repetition			среднее по повторностям / average in repetitions	
	уставка частоты дозаторов n_1, Гц / frequency setting of dispensers n_1, Hz x_1	уставка упреждения досыпки m, г / pre-filling setpoint m, g x_2	уставка включения скорости досыпки t, % / setting points for switching on the filling speed t, % x_3	уставка частоты дозаторов n_2, % / frequency settings of dispensers n_2, % x_4	заданная масса навески M_Z, г / the specified weight of the suspension M_Z, g x_5	1	2	3		y
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	40	80	50	70	350	360	356	366	361	3,1
2	30	30	50	70		374	385	377	379	8,3
3	50	30	50	70		440	451	441	444	26,9
4	30	130	50	70		286	280	289	285	-18,6
5	50	130	50	70		313	328	334	325	-7,1
6	40	80	10	40		300	315	316	310	-11,4
7	40	80	90	40		440	446	424	437	24,9
8	40	80	10	100		458	455	442	452	29,1
9	40	80	90	100		454	463	460	459	31,1
10	40	80	50	70		364	365	355	361	3,1
11	40	30	50	70	150	223	244	254	240	60,0
12	40	130	50	70		123	144	132	133	-11,3
13	40	30	50	70	550	612	618	611	614	11,6
14	40	130	50	70		511	519	519	516	-6,2
15	30	80	10	70	350	334	333	331	333	-4,9
16	50	80	10	70		407	390	398	398	13,7
17	30	80	90	70		362	348	365	358	2,3
18	50	80	90	70		480	476	472	476	36,0
19	40	80	50	70		366	367	365	366	4,6
20	40	80	50	40	150	181	205	182	189	26,0
21	40	80	50	100		235	248	243	242	61,3

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
22	40	80	50	40	550	511	514	524	516	-6,2
23	40	80	50	100		673	659	662	665	20,9
24	40	30	10	70	350	419	431	428	426	21,7
25	40	130	10	70		303	322	312	312	-10,9
26	40	30	90	70		482	489	491	487	39,1
27	40	130	90	70		398	392	381	390	11,4
28	40	80	50	70		360	372	364	365	4,3
29	30	80	50	40		299	302	298	300	-14,3
30	50	80	50	40		378	381	382	380	8,6
31	30	80	50	100		380	370	377	376	7,4
32	50	80	50	100		517	501	510	509	45,4
33	40	80	10	70	150	147	151	164	154	2,7
34	40	80	90	70		241	245	242	243	62,0
35	40	80	10	70	550	268	560	552	560	1,8
36	40	80	90	70		620	622	617	620	12,7
37	40	80	50	70	350	379	372	370	374	6,9
38	30	80	50	70	150	151	151	137	146	-2,7
39	50	80	50	70		202	213	203	206	37,3
40	30	80	50	70	550	538	535	540	538	-2,2
41	50	80	50	70		563	558	568	563	2,4
42	40	30	50	40	350	372	269	373	371	6,0
43	40	130	50	40		298	307	312	306	-12,6
44	40	30	50	100		492	523	501	505	44,3
45	40	130	50	100		396	417	399	404	15,4
46	40	80	50	70		376	365	379	373	6,6

Адекватность полученной регрессионной модели подтверждается высоким значением коэффициента детерминации, значение которого составило R^2 = 93,4212 %. Значимыми в данном случае являются 12 эффектов, так как они имеют Р-значения менее 0,05. В программе Statgraphics при анализе диаграммы Парето выявлено, что наиболее существенным является фактор x_2: с увеличением значения уставки упреждения досыпки m погрешность дозирования снижается. Анализ статистики Дарбина-Уотсона (DW = 2,47) показал, что значение последовательной автокорреляции в остатках находится на уровне значимости 5 %. Следовательно, полученная модель может быть признана адекватной и пригодной для описания исследуемого процесса.

С помощью программы Statgraphics определили значения факторов, сочетание которых дает погрешность дозирования, равную 0 (табл. 2).

Таблица 2 – **Оптимальное сочетание факторов при дозировании зерна ячменя /**
Table 2 – **Optimal combination of factors in the dosing of barley grain**

Наименование / Name	*Комбинации исследуемых факторов / Combinations of the studied factors*		
	№ 1 / No 1	*№ 2 / No 2*	*№ 3 / No 3*
Уставка частоты дозаторов n_1, Гц / Frequency setting of dispensers n_1, Hz	39,9	31,4	30,3
Уставка упреждения досыпки m, г / Pre-filling setpoint m, g	83,5	34,8	31,8
Уставка включения скорости досыпки t, % / setting points for switching on the filling speed t, %	49,0	44,6	11,9
Уставка частоты дозаторов n_2, % / Frequency settings of dispensers n_2, %	66,1	59,2	40,9
Фактическая масса навески M_F, г / The actual weight of the attachment M_F, g	359,8	384,5	202,8

На следующем этапе исследований определяли точность дозирования мела и соли при установленных комбинациях факторов. Сначала определили влияние заданной массы навески M_Z при комбинации факторов № 1. В результате выявлено, что дозирование соли осуществляется по закономерности, близкой к кривой по зерну, а погрешность дозирования находится в допустимых пределах 5 %. Мел при заданной комбинации факторов невозможно взвесить с допустимой точностью, даже при увеличении массы навески до 1 кг (рис. 3). В целом с увеличением массы навески наблюдается снижение погрешности дозирования.

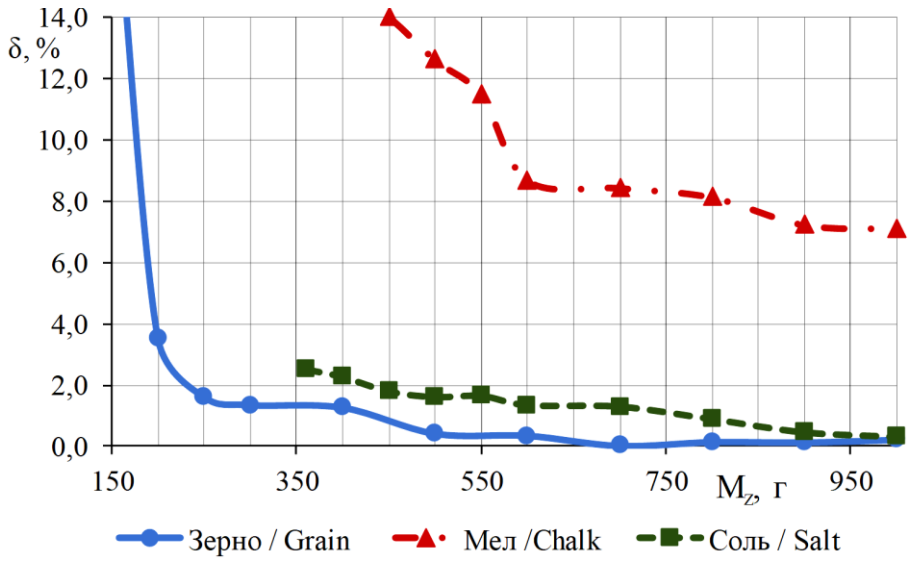

Рис. 3. **Влияние массы навески M_z на точность дозирования при n_1 = 39,9 Гц, t = 49,0 %, n_2 = 66,1 % от n_1 (26,4 Гц), m = 83,5 г /**
Fig. 3. **The effect of the weight of the suspension M_z on the dosing accuracy at n_1 = 39.9 Hz, t = 49.0 %, n_2 = 66.1 % of n_1 (26.4 Hz), m = 83.5 g**

Так как невозможно провести дозирование мела (даже 1 кг) при данных параметрах, принято решение изменить значение уставки упреждения досыпки m. Опыты показали, что допустимую погрешность дозирования мела наблюдали при снижении m до 30 г. Поэтому проведены дополнительные исследования при дозировании мела и соли в зависимости от заданной массы навески M_Z при m = 30 г. Как показывают результаты исследования, при заданных значениях исследуемых параметров невозможно добиться допустимой погрешности дозирования компонентов с различными физико-механическими свойствами (рис. 4). Принято решение отказаться от комбинации факторов № 1.

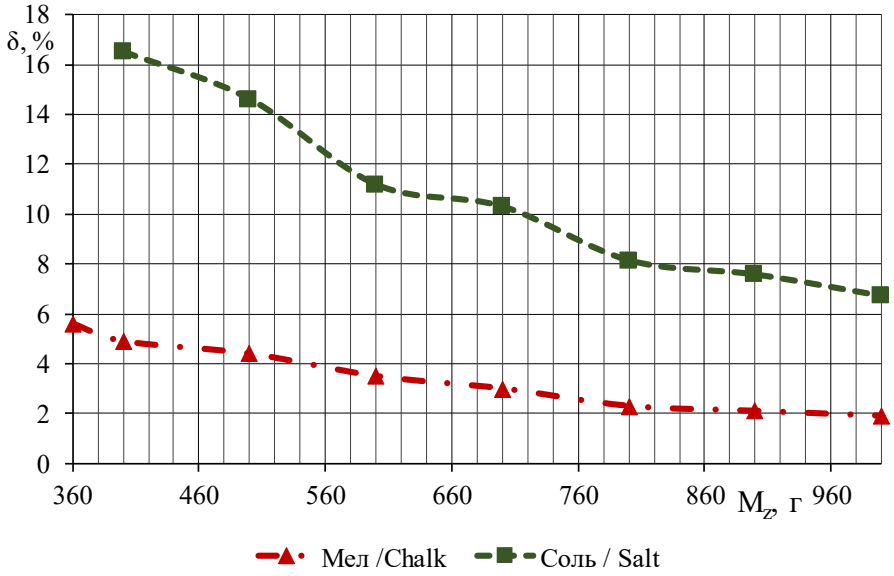

Рис. 4. **Влияние массы навески M_z на точность дозирования при n_1 = 39,9 Гц, t = 49,0 %, n_2 = 66,1 % от n_1 (26,4 Гц), m = 30 г /**

Fig. 4. **The effect of the weight of the suspension M_z on the dosing accuracy at n_1 = 39.9 Hz, t = 49.0 %, n_2 = 66.1 % of n_1 (26.4 Hz), m = 30 g**

Так как с увеличением заданной массы навески M_Z погрешность дозирования снижается, принято решение для последующих комбинаций определить влияние на критерий оптимизации уставки упреждения досыпки m при фиксированных значениях остальных факторов. Выявлено, что при комбинации факторов №2 невозможно достичь необходимой точности дозирования для всех компонентов (рис. 5).

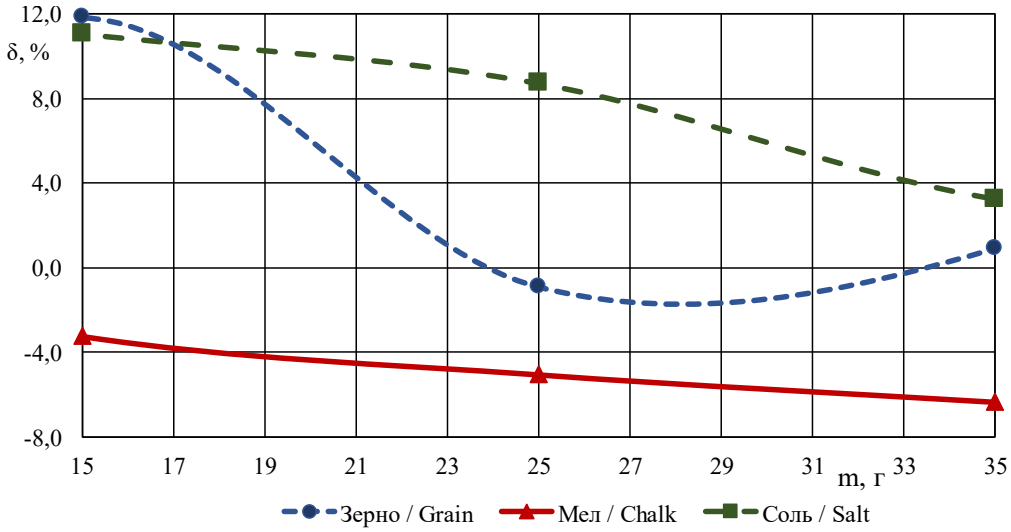

Рис. 5. **Влияние уставки упреждения досыпки m на точность дозирования при n_1 = 31,4 Гц, t = 44,6587 %, n_2 = 59,2 % от n_1 (18,6 Гц), M_Z = 384,5 г**

Fig. 5. **Influence of the pre-filling setpoint m on the dosing accuracy at n_1 = 31.4 Hz, t = 44.6587 %, n_2 = 59.2 % of n_1 (18.6 Hz), M_Z = 384.5 g**

Комбинация факторов №3 – зерно и соль с допустимой погрешностью при m = 13…32 г. В данном случае дозирование мела с необходимой точностью достигается при значениях уставки упреждения досыпки m, меньшими 15 г. Методом наложения допустимых значений определили интервал значений уставки упреждения досыпки m = 13…16 г, при котором достигается допустимая погрешность дозирования для всех исследуемых компонентов (рис. 6).

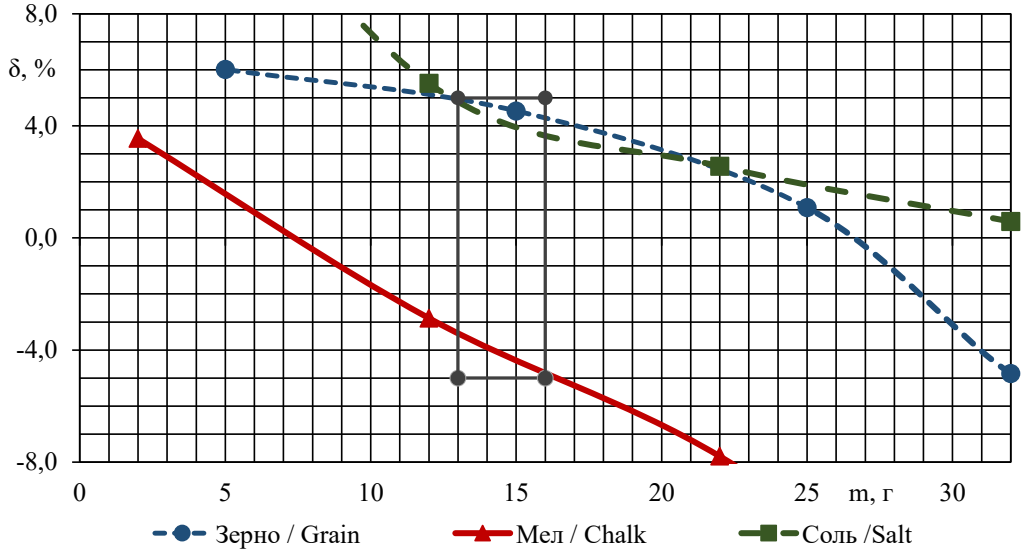

Рис. 6. **Влияние уставки упреждения досыпки m на точность дозирования при n_1 = 30,3 Гц, t = 11,9 %, n_2 = 40,9 % от n_1 (12,42 Гц), M_Z = 202,8 г**

Fig. 6. **Influence of the pre-filling setpoint m on the dosing accuracy at n_1 = 30.3 Hz, t = 11.9 %, n_2 = 40.9 % of n_1 (12.42 Hz), M_Z = 202.8 g**

Заключение. Проведенные исследования позволили определить наилучшую комбинацию факторов, при которой погрешность дозирования не превышает допустимое значение при взвешивании зерна, соли и мела: n_1 = 30,3 Гц, t = 11,9 %; n_2 = 40,9 % от n_1 (12,42 Гц), M_Z = 202,8 г. При данных значениях исследуемых параметров можно производить дозирование компонентов с допустимой погрешностью массой навески более 200 г. Кроме того, с допустимой погрешностью при найденных настроечных параметрах возможно осуществлять дозирование и других компонентов, насыпная плотность которых лежит в пределах насыпной плотности исследованных культур, а именно от 0,6 до 1,2 г/см^3.

Список литературы

1. Буяров В. С., Буяров А. В. Технологические и экономические аспекты развития мясного птицеводства. Биология в сельском хозяйстве. 2022;(2(35)):7–12. Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=48879096 EDN: ZAVDQW

2. Каиров В. Р., Газзаева М. С., Гатциев М. А. Продуктивность и качественные показатели мяса цыплят-бройлеров при скармливании в составе рациона. Известия Горского государственного аграрного университета. 2020;57(1):68–73. Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=42572854 EDN: MPOTGO

3. Аржанкова Ю. В., Томаева О. Н. Рост цыплят-бройлеров при использовании комбикормов отечественного и импортного производства. Известия Великолукской государственной сельскохозяйственной академии. 2022;(4(41)):10–20. DOI: https://doi.org/10.56323/23088583_2022_04_10 EDN: JSCTCB

4. Томаева О. Н., Аржанкова Ю. В. Абсолютный прирост цыплят-бройлеров при использовании комбикормов отечественного и импортного производства. Научно-практический прогресс в сельскохозяйственном производстве: сб. тез. Международн. студенч. научн.-практ. конф. Великолукская государственная сельскохозяйственная академия. Великие Луки, 2022. С. 44–47. Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=50452794 EDN: VCYWXJ

5. Буркина А. С. Технологические решения при производстве рассыпных комбикормов. Наука молодых – будущее России: сб. ст. V Всеросс. научн.-практ. конф. Пенза: Наука и Просвещение, 2023. С. 49–52. Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=53811442 EDN: NNTWJF

6. Chongchitpaisan P., Sudsawat S. A Review on Screw Conveyors for Bulk Materials in Various Applications. Ladkrabang Engineering Journal. 2022;39(2):1–12. URL: https://www.researchgate.net/publication/361655904

7. Minglani D., Sharma A., Pandey H., Dayal R., Joshi J. B., Subramaniam S. A review of granular flow in screw feeders and conveyors. Power Technology. 2020;366:369–381. DOI: https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.02.066

8. Wagner R. Bulk Material Characteristics. Material Code. Conveyor Size and Speed. Component Groups. In Handbook of Screw Conveyor for Bulk Material, Naples, FL, USA: Conveyor Equipment Manufacture Association. 2019;2(3):28–34. URL: https://books.google.ru/books/about/Screw_conveyors.html?hl=ru&id=8dlSAAAAMAAJ

9. Hevko R., Rohatynskyi R., Hevko M., Lyashuk O., Trokhaniak O. Investigation of sectional operating elements for conveying agricultural materials. Research in Agricultural Engineering. 2020;66(1):18–26. DOI: https://doi.org/10.17221/25/2019-RAE

10. Olanrewaju T. O., Jeremiah I. M., Onyeanula P. E. Design and fabrication of a screw conveyor. Agricultural Engineering International. 2017;19(3):156–162. URL: https://cigrjournal.org/index.php/Ejounral/article/view/4097

11. Ozbek O. Fuzzy modeling of volumetric efficiency and specific energy consumption in agricultural screw conveyors. Rural Engineering. 2020;50(5):1–8. DOI: https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20190764

12. Pezo M., Pezo L., Jovanovic A. P., Terzic A., Andric L., Loncar B., Kojic P. Discrete element model of particle and premixing action in modified screw conveyors. Powder Technology. 2018;336:255–264. DOI: https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.06.009

13. Yang Z., Xiaoxia S., Wenjun M. Research on the axial velocity of the raw coal particles in vertical screw conveyor by using the discrete element method. Journal of Mechanical Science and Technology. 2021;35(6):2551–2560. DOI: https://doi.org/10.1007/s12206-021-0526-z

14. Sun L., Zhang X., Zeng Q., Gao K., Jiang K., Zhou J. Application of a screw conveyor with axial tilt blades on a shearer drum and investigation of conveying performance based on DEM. Particuology. 2022;61:91–102. DOI: https://doi.org/10.1016/j.partic.2021.06.001

15. Сеидова И. А. Физико-механические свойства комбикорма и его основных компонентов. Вестник Омского государственного аграрного университета. 2022;1(45):139–146. DOI: https://doi.org/10.48136/2222-0364_2022_1_139 EDN: SVBQGC

16. Ушаков Ю. А., Пушко В. А., Ягудин А. Р., Тимофеев А. О. Устройство объёмного дозирования сыпучих компонентов для производства комбикормов. Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2020;3(83):226–229. Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=43680090 EDN: RMYWFE

17. Буркина А. С. Совершенствование развития процесса дозирования комбикормов. Студенческие научные исследования: сб. ст. XVII Международн. научн.-практ. конф. Пенза: Наука и Просвещение, 2023. С. 76–78. Режим доступа: https://elibrary.ru/mwuvxr EDN: MWUVXR

18. Булатов С. Ю., Нечаев В. Н., Сергеев А. Г., Савиных П. А. Результаты исследований весового дозирования ингредиентов комбикорма. Техника и оборудование для села. 2021;(1(283)):20–24. Режим доступа: https://rosinformagrotech.ru/data/tos/arkhiv-zhurnala-besplatnyj-dostup/send/73-arkhiv-vypuskov-za-2021-god/1655-tekhnika-i-oborudovanie-dlya-sela-1-283-yanvar-2021

19. Булатов С. Ю., Нечаев В. Н., Пронин А. Н., Тареева О. А. Программа управления системой дозирования сухих сыпучих компонентов: свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2023661766 Российская Федерация. № 2023619279: заявл. 15.05.2023; опубл. 01.06.2023. Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=54048560 EDN: GBEEPC

20. Зимин И. Б., Черепанов В. Н., Богатов Е. А., Смирнов А. В. Инновационная технология производства полнорационного комбикорма на промышленной основе в условиях крупных агропромышленных предприятий. Известия Великолукской государственной сельскохозяйственной академии. 2021;(3(36)):50–58. Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=47152605 EDN: FQFFEF

21. Боровикова К. А., Лопаева Н. Л. Технология производства комбикормов. Молодежь и наука. 2023;5:30. Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=54283506 EDN: NLSGUJ

References

1. Buyarov V. S., Buyarov A. V. Technological and economic aspects of the development of meat poultry. *Biologiya v sel'skom khozyaystve* = Biology in agriculture. 2022;(2(35)):7–12. (In Russ.). URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=48879096

2. Kairov V. R., Gazzaeva M. S., Gattsiev M. A. Productivity and quality indicators of broiler chicken meat when feeding antioxidants as part of a diet. *Izvestiya Gorskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Proceedings of Gorsky State Agrarian University. 2020;57(1):68–73. (In Russ.). URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=42572854

3. Arzhankova Yu. V., Tomaeva O. N. The weight gain of broiler chickens when using domestic and imported compound feeds. *Izvestiya Velikolukskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii*. 2022;(4(41)):10–20. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.56323/23088583_2022_04_10

4. Tomaeva O. N., Arzhankova Yu. V. Absolute growth of broiler chickens when using compound feeds of domestic and imported production. Scientific and practical progress in agricultural production: Collection of abstracts of the International Student Scientific and Practical Conference. *Velikolukskaya gosudarstvennaya sel'skokhozyaystvennaya akademiya*. Velikie Luki, 2022. pp. 44–47. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=50452794

5. Burkina A. S. Technological solutions for the production of bulk feed. Science of the young is the future of Russia: collection. Collection of articles, V All-Russian scientific-practical conf. Penza: *Nauka i Prosveshchenie*, 2023. pp. 49–52. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=53811442

6. Chongchitpaisan P., Sudsawat S. A Review on Screw Conveyors for Bulk Materials in Various Applications. Ladkrabang Engineering Journal. 2022;39(2):1–12. URL: https://www.researchgate.net/publication/361655904

7. Minglani D., Sharma A., Pandey H., Dayal R., Joshi J. B., Subramaniam S. A review of granular flow in screw feeders and conveyors. Power Technology. 2020;366:369–381. DOI: https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.02.066

8. Wagner R. Bulk Material Characteristics. Material Code. Conveyor Size and Speed. Component Groups. In Handbook of Screw Conveyor for Bulk Material, Naples, FL, USA: Conveyor Equipment Manufacture Association. 2019;2(3):28–34. URL: https://books.google.ru/books/about/Screw_conveyors.html?hl=ru&id=8dlSAAAAMAAJ

9. Hevko R., Rohatynskyi R., Hevko M., Lyashuk O., Trokhaniak O. Investigation of sectional operating elements for conveying agricultural materials. Research in Agricultural Engineering. 2020;66(1):18–26. DOI: https://doi.org/10.17221/25/2019-RAE

10. Olanrewaju T. O., Jeremiah I. M., Onyeanula P. E. Design and fabrication of a screw conveyor. Agricultural Engineering International. 2017;19(3):156–162. URL: https://cigrjournal.org/index.php/Ejounral/article/view/4097

11. Ozbek O. Fuzzy modeling of volumetric efficiency and specific energy consumption in agricultural screw conveyors. Rural Engineering. 2020;50(5):1–8. DOI: https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20190764

12. Pezo M., Pezo L., Jovanovic A. P., Terzic A., Andric L., Loncar B., Kojic P. Discrete element model of particle and premixing action in modified screw conveyors. Powder Technology. 2018;336:255–264. DOI: https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.06.009

13. Yang Z., Xiaoxia S., Wenjun M. Research on the axial velocity of the raw coal particles in vertical screw conveyor by using the discrete element method. Journal of Mechanical Science and Technology. 2021;35(6):2551–2560. DOI: https://doi.org/10.1007/s12206-021-0526-z

14. Sun L., Zhang X., Zeng Q., Gao K., Jiang K., Zhou J. Application of a screw conveyor with axial tilt blades on a shearer drum and investigation of conveying performance based on DEM. Particuology. 2022;61:91–102. DOI: https://doi.org/10.1016/j.partic.2021.06.001

15. Seidova I. A. Physico-mechanical properties of compound feed and its main components. *Vestnik Omskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Vestnik of Omsk SAU. 2022;1(45):139–146. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.48136/2222-0364_2022_1_139

16. Ushakov Yu. A., Pushko V. A., Yagudin A. R., Timofeev A. O. The device for volumetric dosing of bulk components for mixed feeds production. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Izvestia Orenburg State Agrarian University. 2020;3(83):226–229. (In Russ.). URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=43680090

17. Burkina A. S. Improving the development of the process of dosing compound feeds. Student scientific research: collection of articles, XVII International scientific-practical conf. Penza: *Nauka i Prosveshchenie*, 2023. pp. 76–78. URL: https://elibrary.ru/mwuvxr

18. Bulatov S. Yu., Nechaev V. N., Sergeev A. G., Savinykh P. A. Results of research of weight batching of feed compound ingredients. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela* = Machinery and Equipment for Rural Area. 2021;(1(283)):20–24. (In Russ.). URL: https://rosinformagrotech.ru/data/tos/arkhiv-zhurnala-besplatnyj-dostup/send/73-arkhiv-vypuskov-za-2021-god/1655-tekhnika-i-oborudovanie-dlya-sela-1-283-yanvar-2021

19. Bulatov S. Yu., Nechaev V. N., Pronin A. N., Tareeva O. A. Control program for the dosing system of dry bulk components: Certificate of registration of a computer program RF No. 2023661766. 2023. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=54048560

20. Zimin I. B., Cherepanov V. N., Bogatov E. A., Smirnov A. V. Innovative technology for the complete feed production on an industrial basis in large agro-industrial enterprises. *Izvestiya Velikolukskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii*. 2021;(3(36)):50–58. (In Russ.). URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=47152605

21. Borovikova K. A., Lopaeva N. L. Technology of compound feed production. *Molodezh' i nauka* = Youth and science. 2023;5:30. (In Russ.). URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=54283506

Сведения об авторах

✉ **Булатов Сергей Юрьевич**, доктор техн. наук, доцент, профессор кафедры «Технический сервис», ГБОУ ВО «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет», ул. Октябрьская, д. 22, г. Княгинино, Нижегородская область, Российская Федерация, 606340, e-mail: ngiei-126@mail.ru, **ORCID**: **https://orcid.org/0000-0001-9099-0447**, e-mail: bulatov_sergey_urevich@mail.ru

Пронин Алексей Николаевич, аспирант, ГБОУ ВО «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет», ул. Октябрьская, д. 22, г. Княгинино, Нижегородская область, Российская Федерация, 606340, e-mail: ngiei-126@mail.ru, **ORCID**: **https://orcid.org/0009-0009-2410-3382**

Information about the authors

✉ **Sergey Yu. Bulatov**, DSc in Engineering, associate professor, professor at the Department of Technical Service, Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics, Oktyabrskaya str., 22, Knyaginino, Nizhny Novgorod Region, Russian Federation, 606340, e-mail: ngiei-126@mail.ru, **ORCID**: **https://orcid.org/0000-0001-9099-0447,** e-mail: bulatov_sergey_urevich@mail.ru

Alexey N. Pronin, postgraduate student, Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics, Oktyabrskaya str., 22, Knyaginino, Nizhny Novgorod region, Russian Federation, 606340, e-mail: ngiei-126@mail.ru, **ORCID**: **https://orcid.org/0009-0009-2410-3382**

✉ – Для контактов / Corresponding author

https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.1.134-150
УДК 62-9 + 628.385

(cc) BY

Подбор мешалки и оптимизация процесса перемешивания субстрата в ферментере биогазовой установки

© 2024. А. А. Рубцов[1], Д. А. Немущенко[2] ✉
[1]*ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», г. Кемерово, Российская Федерация*
[2]*ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск, Российская Федерация*

Актуальность работы связана с проблемой деградации почвенного покрова в результате загрязнения отходами животноводства и необходимостью своевременной их утилизации в эффективное органическое удобрение и биогаз. Увеличение доли использования органических удобрений позволяет развивать технологии органического земледелия, а соответственно приводит к получению здоровой растениеводческой продукции. В работе исследовался процесс перемешивания субстрата в ферментерах действующей опытной биогазовой установки. Технологическая линия предназначена для переработки жидких органических отходов, преимущественно навоза или помета, методом анаэробного сбраживания с получением инновационных экологически чистых органических удобрений в промышленных масштабах. Цель исследования – подбор мешалки и оптимизация условий перемешивания субстрата в ферментерах биогазовой установки. Физико-химические свойства субстрата исследовались лабораторными методами. Математическая модель процесса перемешивания основана на полуэмпирическом описании гидродинамики потоков в реакторе, модернизирована с учетом современного состояния вопроса под условия ферментера с конкретными геометрическими характеристиками. В результате проведенной работы определены оптимальные варианты геометрических размеров мешалок (три варианта трехлопастных мешалок периодического действия с углом наклона лопастей 30°, отличающиеся размером рабочего колеса и частотой вращения) и рассчитаны параметры процесса перемешивания. На основе лабораторного эксперимента и результатов расчета скорости осаждения определена периодичность включения мешалки (1 раз в сутки) и время ее непрерывной работы для гомогенизации суспензии. Результаты работы могут быть использованы при проектировании смесительных устройств и режимов перемешивания субстрата в биореакторах.

Ключевые слова: *биореактор, режим перемешивания, смесительное устройство, органическое удобрение, отходы животноводства, утилизация отходов*

Благодарности: работа выполнена в рамках инициативной научно-исследовательской темы ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет».

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Рубцов А. А., Немущенко Д. А. Подбор мешалки и оптимизация процесса перемешивания субстрата в ферментере биогазовой установки. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2024;25(1):134–150.
DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.1.134-150

Поступила: 22.11.2023 Принята к публикации: 16.01.2024 Опубликована онлайн: 28.02.2024

Selecting a stirrer and optimizing the process of mixing the substrate in the fermenter of biogas unit

© 2024. Aleksandr A. Rubcov[1], Dmitriy A. Nemuschenko[2] ✉
[1]*Kemerovo State University, Kemerovo, Russian Federation*
[2]*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation*

The relevance of the work is related to the problem of soil degradation as a result of pollution by livestock waste and the need for timely disposal of waste into effective organic fertilizer and biogas. Increasing the share of the use of organic fertilizers makes it possible to develop organic farming technologies, and accordingly leads to the production of healthy crop products. The work investigated the process of substrate mixing in the fermenters of an operating pilot biogas plant. The technological line is designed for processing liquid organic waste, mainly manure or litter, by anaerobic digestion to produce innovative environmentally friendly organic fertilizers on an industrial scale. The purpose of the study was to select a stirrer and optimize the conditions for mixing the substrate in the fermenters of a biogas plant. The physicochemical properties of the substrate were studied by laboratory methods. The mathematical model of the mixing process is based on a semi-empirical description of the hydrodynamics of flows in the reactor, modernized taking into account the current state of the issue under the conditions of a fermenter with specific geometric characteristics. As a result of the work carried out, the optimal options for the geometric dimensions of the stirrers were determined (three variants for three-blade stirrers intermittent with a blade angle of 30°, differing in the size of the impeller and rotation speed) and the parameters of the mixing process were calculated. Based on a laboratory experiment and the results of calculating the sedimentation rate, the frequency of turning on the stirrer (once a day) and the time of its continuous operation to homogenize the suspension were determined. The results of the work can be used in the design of mixing devices and substrate mixing modes in bioreactors.

Keywords: *bioreactor, process of mixing, stirrer, organic fertilizer, animal waste, waste disposal*

Acknowledgements: the study was carried out within the initiative research theme of Kemerovo State University. The authors thank the reviewers for their contributions to the peer review of this work.

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

For citation: Rubcov A. A., Nemuschenko D. A. Selecting a stirrer and optimizing process of mixing the substrate in the fermenter of biogas unit. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2024;25(1):134–150. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.1.134-150

Received: 22.11.2023 Accepted for publication: 16.01.2024 Published online: 28.02.2024

Необходимость утилизации массовых отходов животноводства является одной из наиболее актуальных задач сельхозпроизводителей. Загрязнение почвенного покрова, поверхностных и подземных вод такими отходами приводит к деградации окружающей среды, поэтому важно своевременно их утилизировать. В мировой практике имеется достаточный опыт производства биогазовых установок, позволяющих использовать в качестве сырья коммунальные и сельскохозяйственные отходы с получением, в том числе, эффективного удобрения. Органические удобрения – важнейший элемент технологии получения здоровой растениеводческой продукции.

Перемешивание субстрата в биореакторах преследует следующие цели [1, 2, 3]:

– ускорение заквашивания свежей порции сырья вследствие контакта с биологически активной жидкостью в реакторе, поддержание контакта между ферментами и их субстратами;

– равномерное распределение тепла и питательных веществ по объему реактора;

– предотвращение образования корочки на границе жидкой и газообразной сред;

– интенсификация выделения биогаза из субстрата.

Перемешивание может производиться механическими приспособлениями в ферментере (мешалками), перекачиванием сырья из верхней зоны в нижнюю с помощью насоса, расположенного, как правило, вне реактора [4], и пневматически посредством барботирования биогазом массы в реакторе. Преимущества и недостатки указанных методов перемешивания подробно описаны в [5]. В Германии развита целая система биогазовых станций, до 90 % установок укомплектованы различными по конструкции мешалками [1].

В работе [6] приведена интересная конструкция установки метанового брожения, технология запатентована [7]. Установка реализует метод перемешивания, основанный на внешней циркуляции сырья, отличается подводом субстрата в верхнюю и нижнюю часть цилиндрического реактора одновременно. Верхний выпускной патрубок оснащен аксиально-лопастным «закручивателем». Подача снизу препятствует образованию осадка, закручивающее устройство позволяет разбивать корку.

Обзорная статья [8] посвящена анализу влияния режимов перемешивания на процесс сбраживания в реакторе, а точнее на выход метана. Отмечается важность проектирования режима смешения с учетом, прежде всего, процессов на химическом и микробиологическом уровнях, требуется учитывать стадии анаэробного сбраживания – гидролиз, ацидогенез, ацетогенез и метаногенез.

Экспериментальные исследования показали, что при сбраживании отходов жизнедеятельности крупного рогатого скота (КРС) выход биогаза увеличивается при перемешивании субстрата в сравнении с вариантом без перемешивания в работе [8] – на 70 %, в работе [9] – в 1,5 раза. Наблюдается рост выхода газа при увеличении частоты вращения мешалки [8].

Напротив, высокая интенсивность перемешивания и возникающие напряжения сдвига отрицательно сказываются на жизнедеятельности микроорганизмов – подавляется их активность, разрушается флокуляционная структура («консорциумы микроорганизмов») [8, 10]. Некоторые виды микроорганизмов могут быть уязвимыми к механическим повреждениям из-за особой морфологии клеток – нитевидных или других структур со значительными линейными размерами. Есть публикации, показывающие необходимость организации в реакторе «защитных» застойных зон, которые могут служить центрами инициации метаногенов и защищать их от закисления [8].

Кроме того, непрерывная работа мешалки способствует быстрому гидролизу, в результате чего накапливаются кислоты, ингибирующие метаногенные бактерии. В работе [8] анализируется механизм снижения выхода биогаза при интенсивном перемешивании. Отмечаются работы авторов, которые показали на экспериментальных данных, что даже при полном разрушении конгломератов (хлопьев) микроорганизмов валовой выход биогаза не уменьшается.

Противоречащие результаты приведены по выходу биогаза при варьировании режимов перемешивания (частота вращения мешалки, периодичность включения) – выход газа мог возрастать и падать при схожих режимах обработки [4, 8]. Однозначно показано, что наличие перемешивания увеличивает выход газа в сравнении с его полным отсутствием, а периодическое перемешивание лучше непрерывного в силу меньших затрат электроэнергии. Авторы [4] исследовали реактор с перемешиванием методом циркуляции субстрата внешним насосом. Пришли к выводу, что непосредственно интенсивность перемешивания не дает значительного вклада в выход биогаза, но совместно с подачей свежей порции субстрата эффективность установки растет.

В лабораторном исследовании [11] сравнивали выход биогаза из реакторов, оснащенных различными способами перемешивания: с помощью циркуляции газа или субстрата и пропеллерной мешалкой (установлена вертикально по оси реактора, диаметр 62 мм, частота вращения 275 об/мин, диаметр цилиндрического реактора 152 мм). Интенсивность перемешивания субстрата подбирали исходя из рекомендаций Агентства по охране окружающей среды США для допустимого энергопотребления при смешивании в реакторах – 8 Вт/м^3. В процессе сбраживания периодически отбирали пробы, отражающие биохимические процессы, анализировался состав биогаза и его выход. Сделан вывод о незначительном влиянии способа перемешивания и вообще его наличия на выход биогаза – рост в рамках погрешности эксперимента. Значительной разницы между способами перемешивания также не обнаружено. Отмечается, что перемешивание оказывает бóльшее влияние на выход биогаза в случае сбраживания более концентрированных субстратов.

С целью оценки эффективности перемешивания, подбора конструкции мешалки и режимов ее работы наиболее часто используют методы математического моделирования гидродинамических условий в ферментере [8, 2, 9, 10]. При моделировании особое внимание уделяется наличию зон в реакторе с высокой интенсивностью движения субстрата и застойных зон. Дискуссионными остаются вопросы учета отдельных параметров гидродинамического процесса и физических характеристик субстрата, особенно в части их изменения в процессе сбраживания (от нескольких дней до нескольких месяцев).

В работе [10] моделировался реактор диаметром 18 м, объемом 1400 м^3, использовали две пропеллерные трехлопастные мешалки с погружным двигателем, расположенные диаметрально на стойках в объеме реактора (вал мешалки располагался горизонтально, перпендикулярно оси реактора). При расчетах варьировали высоту расположения мешалки над днищем аппарата и угол поворота мешалки в горизонтальной плоскости.

В исследованиях [2, 12] критериями эффективности перемешивания приняты однородность поля температур и поля скоростей по объему реактора, процент максимальных температур, процент холодных (температура ниже установленного режима сбраживания) застойных зон и зон с близкой к нулю скоростью течения. Изучали запатентованные конструкции реакторов с циркуляционными трубами различных конструкций. К сожалению, математическое описание термодинамических параметров в работе отсутствует, не указан способ подогрева реактора/субстрата. Расчетные данные не подтверждены экспериментально.

В работе [13] сделан акцент на проектирование биогазовых установок малой мощности с одним реактором. В лабораторных условиях сравнивали интенсивность образования биогаза на вертикальной цилиндрической установке (объем 17 л) с лопастными мешалками, установленными вертикально, горизонтально и под углом к оси аппарата. Перемешивание производилось в течение 1,5 мин один раз в сутки с частотой 80-100 об/мин. Наибольшую эффективность по выходу биогаза показал реактор с многолопастной мешалкой на горизонтальной оси (перпендикулярно оси аппарата). Результат закономерный, так как, по-видимому, лопасти мешалки расположены под нулевым углом к валу мешалки и при вращении обеспечивают более эффективный массообмен – подъем массы со дна аппарата. Отмечается значительная неравномерность выхода биогаза по времени эксперимента (до 20 дней) на установке без мешалки, что связано с неравномерным распределением микроорганизмов в реакторе и локальным накоплением продуктов переработки.

Авторы работы [14] моделировали поле скоростей в промышленном биореакторе (диаметр 18 м, высота наполнения 5,5 м) и проводили верификацию на лабораторной установке. Принято, что однородность субстрата по объему оптимальна для протекания биохимических процессов, если за критерии однородности выбраны постоянство средней

скорости во всех точках в объеме реактора и пространственные составляющие этой скорости (v_x, v_y, v_z). Исследовали пропеллерную и лопастную мешалки.

Очевидно, что основными критериями эффективности перемешивания будут являться показатели, связанные с качеством получаемой продукции – биогаза и жидкого субстрата. Как показано ранее [15], жидкий субстрат может являться эффективным органическим удобрением, соответственно критерии эффективности производственного процесса в биореакторе должны быть связаны с качественными показателями получаемого удобрения – определенным химическим и микробиологическим составом. В связи с этим полезно рассмотреть работы исследователей, демонстрирующие в некоторой степени возможность моделировать кинетику биохимических реакций в биогазовой установке при различных условиях перемешивания. В частности, в работах [16, 17] математическая модель включает кинетику основных анаэробных процессов – гидролиз сырья, кислотообразование, метаногенез, учитывались концентрации жирных кислот и pH среды. Перемешивание производили с интенсивностью, характеризующейся граничными числами критерия Пекле – 0,0267 и 267. Показано, что при высокой интенсивности перемешивания субстрат преобразуется в бóльшей степени в жирные кислоты, а не в целевой продукт – метан. В качестве сырья в установках использовали смеси коммунальных отходов с отходами животноводства.

На примере сбраживания отходов жизнедеятельности КРС авторами работы [18] дополнительно отбирались пробы для контроля микробных популяций при различных режимах перемешивания в зонах биореактора. Кинетическая модель, описывающая жизнедеятельность микроорганизмов, включала стадию ферментативного гидролиза, четыре стадии микробного роста, эффекты ингибирования.

В работе [19] сделан обзор методов онлайн-мониторинга параметров среды в биореакторе при перемешивании. Экспериментально определяли поля скоростей методом трассерной визуализации (PIV – Particle Image Velocimetry) в модельном реакторе с прозрачным субстратом. Исследовали три типа мешалок: лопастная (частота вращения 100–250 об/мин), пропеллерная (1000–2000 об/мин) и на длинном валу (400–700 об/мин). Варьировали угол наклона вала мешалки к оси реактора. Смоделированы поля скоростей для реакторов, даны рекомендации по расположению датчиков контроля параметров. Так как в работе исследовали наиболее распространенный в Германии тип промышленных установок большого объема, то данный опыт в полной мере невозможно распространить на используемый в нашей работе тип биореактора.

Авторы работы [20] исследовали экспериментальный реактор объемом 923 м^3 (внутренний диаметр 14 м), оборудованный двумя мешалками: длинноосной лопастной (частота вращения 75 об/мин, диаметр 1,6 м) и пропеллерной (365 об/мин, 766 мм). Среднее время перемешивания в час – 20 мин. Кроме поля скоростей по объему реактора, также определяли вязкость, концентрацию сухого вещества и летучих органических соединений, а также буферную емкость. На комплексе измеряемых параметров в течение длительного времени переработки массы в биореакторе (до 6 недель) показаны зависимости изменения скоростей потока от содержания сухого вещества и вязкости субстрата. Содержание сухого вещества за 6 недель увеличилось на 38 %, вязкость возросла на 85 %, соответственно скорость в определенных точках снизилась на 97 %.

Большинство исследователей пришли к выводу, что однозначно определиться с параметрами процесса перемешивания на основе лабораторных экспериментов, результатов моделирования или расчета невозможно [1, 8, 11]. Режимы перемешивания (частота вращения мешалки, периодичность включения) должны определяться на этапе отладки работы биореактора, что, как правило, и делается на реальных объектах. Из-за разнообразия выпускаемых промышленностью конструкций смесительных устройств сравнение результатов моделирования разных авторов является затруднительным.

Цель исследования – подбор мешалки и оптимизация условий перемешивания субстрата в ферментерах действующей опытной биогазовой установки анаэробного сбраживания отходов с целью получения, прежде всего, жидкого субстрата – эффективного органического удобрения.

Научная новизна – исследование физико-химических свойств субстрата биогазовой установки, работающей на отходах жизнедеятельности крупного рогатого скота со специфическим режимом анаэробного сбраживания, и модернизации общепринятой методики моделирования процессов перемешивания для оценки гидродинамических условий в ферментере, имеющем конкретные геометрические размеры и ограничения. Ограничения, прежде всего, связаны со снижением влияния высокой

интенсивности перемешивания на консорциумы микроорганизмов. Указанная методика может быть использована при проектировании смесительных устройств и режимов перемешивания субстрата в биореакторах.

Материал и методы. Представленные далее расчеты основываются на полуэмпирических зависимостях, позволяющих оценить необходимые гидродинамические параметры движения среды в ферментере при перемешивании. Основные решаемые задачи – выбор оптимального перемешивающего устройства и его геометрии, параметров режима перемешивания, дальнейшая оценка необходимой установленной мощности электродвигателя мешалки.

Для расчета конструктивных параметров перемешивающих устройств и гидродинамических режимов процесса используется наиболее распространенная методика, утвержденная приказом СОЮЗХИММАШа, Руководящий документ РД 26-01-90-85[1]. В РД изложены рекомендации по выбору конструкции перемешивающего устройства, методике расчёта мощности, затрачиваемой на перемешивание среды в реакторе при разных режимах. РД устанавливает методы расчета процессов перемешивания для различных по конструкции аппаратов и жидких сред с неодинаковой дисперсностью и вязкостью.

Объектом исследования являются биогазовые установки серии БГУ, предназначенные для переработки органических отходов и получения из них продуктов с высокой добавленной стоимостью: газомоторного топлива (метан), высокоэффективных биоорганических удобрений.

Научно-производственная компания ООО «Станция-А» реализовала в 2020 г. на территории Новосибирского Академгородка проект получения органических удобрений методом анаэробного сбраживания. В основу технологической цепочки положены авторские свидетельства В. Н. Кононова (г. Киров) и А. А. Рубцова (г. Новосибирск) и получен патент на изобретение [21].

На данный момент функционирует опытная установка, произведенная по указанному патенту, получена опытная партия инновационной продукции – удобрение (органобиологическая подкормка). Функциональная схема процесса получения органического удобрения представлена на рисунке 1.

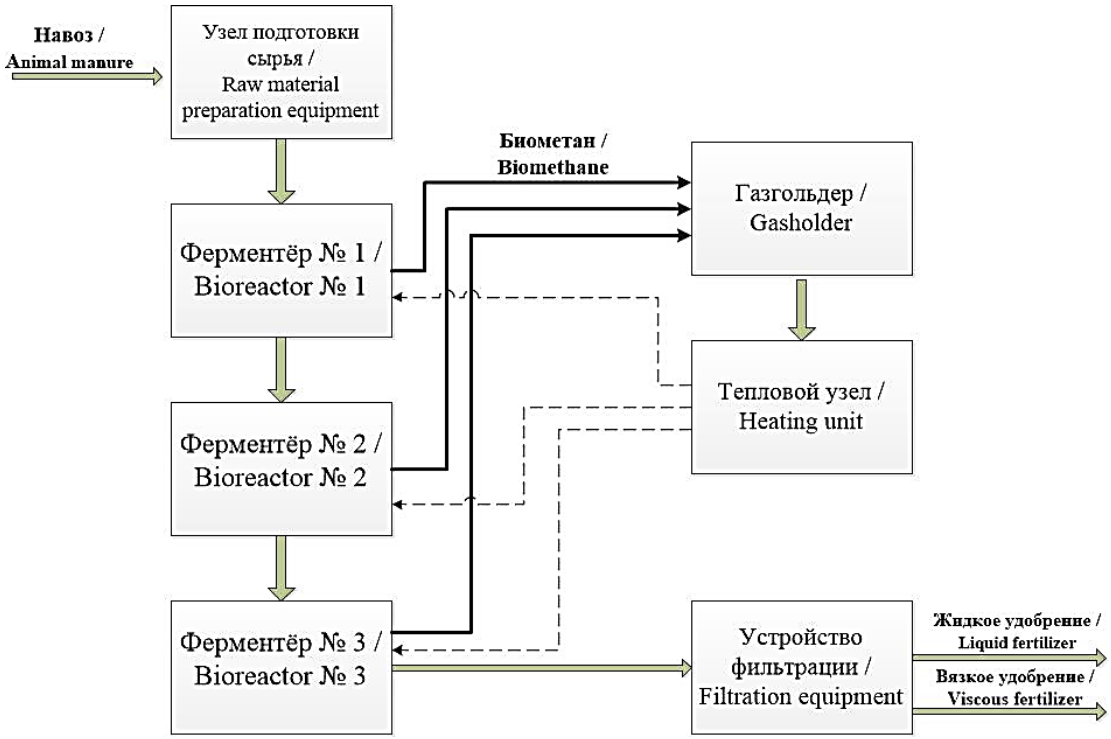

Рис. 1. **Функциональная схема технологического процесса получения органических удобрений /**
Fig. 1. **Functional diagram of the technological process for producing organic fertilizers**

[1]РД 26-01-90-85. Механические перемешивающие устройства. Метод расчёта. Утвержден и введен в действие приказом СОЮЗХИММАШа от 15.11.85 № 129. Л.: РТП ЛенНИИхиммаша, 1985. 257 с.
URL: https://docs.cntd.ru/document/1200043740?ysclid=lpky4qxwu8527597254

Общая схема технологической линии изображена на рисунке 2. На рисунке 3 приводится сборочный чертеж ферментера с обозначением геометрических размеров.

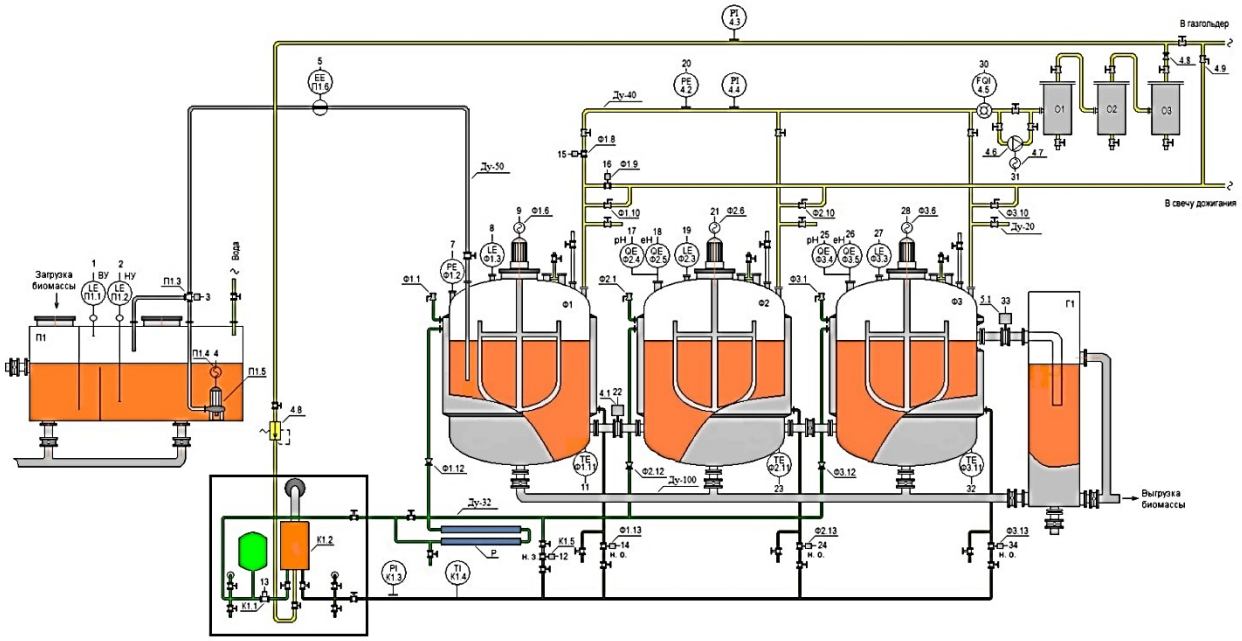

Рис. 2. **Технологическая схема биогазовой станции БГУ /**
Fig. 2. **Technological diagram of the biogas station**

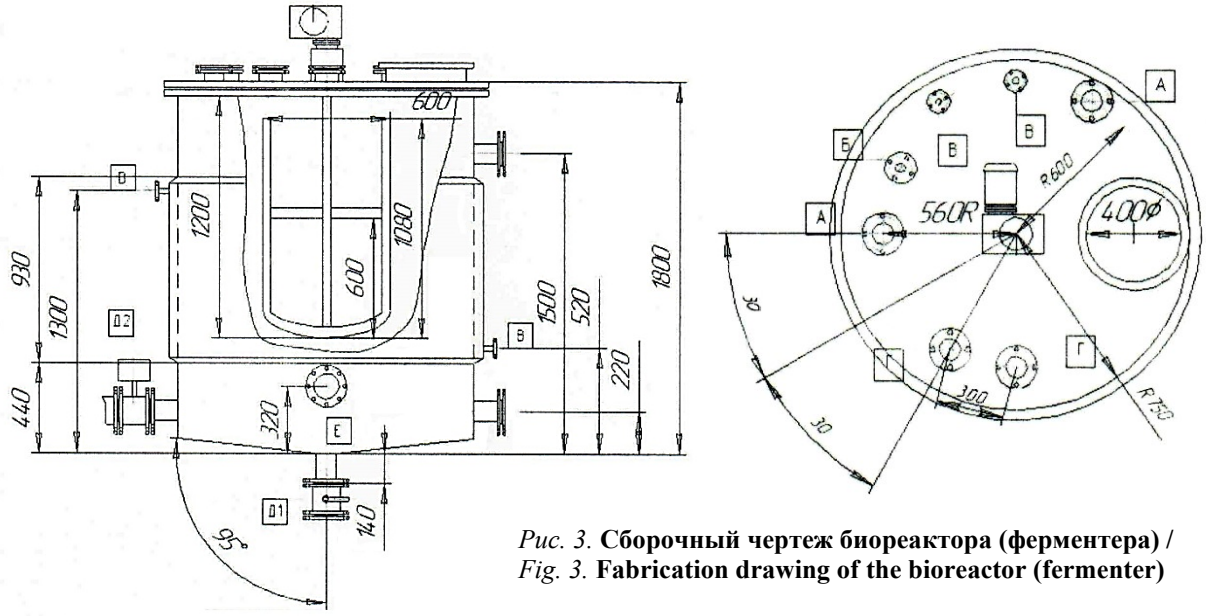

Рис. 3. **Сборочный чертеж биореактора (ферментера) /**
Fig. 3. **Fabrication drawing of the bioreactor (fermenter)**

Описание технологического процесса на стадии ферментации можно представить следующим образом. Основой процесса анаэробного сбраживания является нахождение органического субстрата в бескислородном состоянии в нескольких емкостях (ферментерах) с определенными физико-химическими параметрами, соответствующими параметрам желудочно-кишечного тракта коровы. Каждому ферментеру соответствует своя микробиологическая среда: температура, pH, eH, давление. В последнем ферментере-доброживателе происходит температурное обеззараживание субстрата от патогенной микрофлоры и окончание процесса выделения биогаза (биометана).

Выделение биогаза происходит в процессе анаэробного сбраживания без каких-либо химических добавок. Биогаз проходит очистку и собирается в газгольдере-накопителе. При достижении требуемой порции биогаза по давлению и количеству тепловой узел автоматически переходит на собственное

потребление. Таким образом, выделившийся в технологическом процессе биогаз полностью потребляется установкой, что снижает себестоимость производимого удобрения. Периодическое перемешивание субстрата в ферментерах гомогенизирует и делает субстрат однородным по температуре и плотности, облегчает перелив в последующие ферментеры.

Время нахождения субстрата в ферментерах – 21 сутки, что достаточно для полного оптимального процесса его переработки. Слив порции готового субстрата и закачивание новой порции сырья в первый ферментер производится ежесуточно. Процесс анаэробного сбраживания в ферментерах непрерывный. Рабочая температура в емкостях ферментеров определяется мезофильным режимом сбраживания.

Жидкий субстрат – органическое удобрение образуется в ферментерах при переработке жидких органических отходов (на данный момент – отходы КРС). Влажность удобрения доводится до 96-97 %.

Для целей расчета режимов перемешивания принято, что субстрат представляет собой суспензию (гетерогенная смесь жидкости и взвешенной в ней твердой фазы), учет химических процессов, в том числе вызванных жизнедеятельностью микроорганизмов, не производится. Также при расчете не учитывается изменение реологических свойств суспензии, концентрации твердой фазы и размеров частиц твердой фазы, которые непрерывно происходят в условиях ферментера в результате жизнедеятельности микроорганизмов.

В рамках данной работы пробы субстрата отбирали из третьего ферментера и лабораторные исследования проводили физико-химическими методами. Более подробно характеристики субстрата, образующегося в ферментерах данной биогазовой установки, будут приведены в другой работе авторов. Здесь ограничимся механическими характеристиками субстрата (суспензии), которые необходимы нам в качестве исходных данных для расчета режимов перемешивания (табл. 1).

Таблица 1 – **Физические характеристики субстрата биогазовой установки при рабочей температуре ферментера /** *Table 1* – **Physical characteristics of the substrate of biogas unit at operating temperature of the fermenter**

Проба / Sample	*Массовая концентрация ВВ и СО, мг/л / Mass concentration of SM and DR, mg/l*	*Динамический коэффициент вязкости, мПа·с / Dynamic coefficient of viscosity, mPa·s*	*Плотность субстрата, кг/м³ / Mass density of substrate, kg/m³*	*Средняя плотность твердых частиц, кг/м³ / Average mass density of solid particles, kg/m³*	*Содержание минеральной части в осадке, масс. % / Content of mineral part in the sediment, mass percentage*
Субстрат / Substrate	8224,7±93	0,560	993,5	1980,9	43,0

Примечания: ВВ – взвешенные вещества, СО – сухой остаток / Notes: SM – suspended materials, DR – dry residue.

Определение концентрации взвешенных веществ и сухого остатка проводили с использованием методики РД 52.24.468-2019 «Массовая концентрация взвешенных веществ и сухого остатка в водах. Методика измерений гравиметрическим методом». Суммарное содержание взвешенных веществ и сухого остатка определяли гравиметрическим методом при выпаривании известного объема анализируемой пробы субстрата и высушивании до постоянной массы при температуре 100 °С.

Вязкость измеряли ротационным вискозиметром (экспресс-анализатор ЭАК-1М) с калибровкой по дистиллированной воде.

Определение плотности и средней плотности твердых частиц проводили пикнометрическим методом. Образцы твердой фракции готовились выпариванием аликвоты субстрата в фарфоровых чашках и измельчались в ступке.

Определение минеральной составляющей проводилось выпариванием субстрата в фарфоровых чашках (выделение твердой фракции субстрата) и прокаливанием навески в муфельной печи при 1000 °С.

Согласно РД[2], данная суспензия считается малоконцентрированной, так как объёмная доля твёрдой фазы в ней не превышает 0,1, а массовая – 0,2 (табл. 1). Предполагается отсутствие существенного влияния твёрдых частиц на гидродинамические характеристики при перемешивании.

Обоснование выбора типа мешалки и ее расположения в ферментере. Основная задача, которая решается установкой мешалки в ферментере, – предотвращение расслоения суспензии (субстрата) под действием силы тяжести, т. е. его гомогенизация по вертикали. При этом

[2]РД 26-01-90–85. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200043740?ysclid=lpky4qxwu8527597254

радиальной (по радиусу мешалки) неоднородностью концентрации, формирующейся благодаря возникающей при вращении мешалки центробежной силе, можно пренебречь.

Эффективность перемешивания суспензии можно характеризовать относительной разностью концентраций взвешенных частиц по высоте аппарата (ΔX_{max}) и согласно исследованиям Л. Н. Брагинского с соавт. [22] определением минимальной окружной (линейной, *u*) скорости лопастей мешалки, достаточной для полного подъема твердых частиц с днища, – при бóльшей окружной скорости осадок образовываться не будет. Соответственно, чем меньше абсолютное значение ΔX_{max}, тем эффективнее работает мешалка.

В рамках предварительного расчета предлагается сравнить эффективность распределения твердых частиц при работе мешалки (по параметру ΔX_{max}) для двух видов:

1) рекомендованной трехлопастной мешалки (рис. 4);

2) установленной в аппарате на данный момент рамной мешалки (рис. 5).

В обзорных работах В. М. Барабаш с коллегами [23, 24] отмечено, что наиболее рациональной конструкцией в случаях перемешивания суспензий в вертикальных цилиндрических реакторах является мешалка трехлопастного типа и ее модификации. При этом частота вращения мешалки может быть достаточно низкой, а диаметр, в отличие от типовых вариантов компоновки аппарата по РД[3], достаточно бóльшим. Для дальнейших исследований нами выбрана трехлопастная мешалка (рис. 4) с геометрией, рекомендованной РД[4] и источником [23]. Для интенсификации вертикального перемещения используются наклонные лопасти (30°).

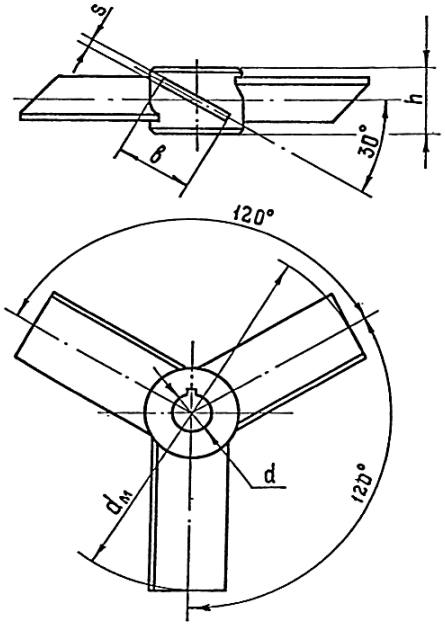

Рис. 4. **Схема трехлопастной мешалки, тип 01[5]: *s, d, b, h* – геометрические параметры, зависящие от $d_м$ /**
Fig. 4. **Diagram of three-bladed stirrer, type 01[5]: *s, d, b, h* – geometric parameters depending on $d_м$**

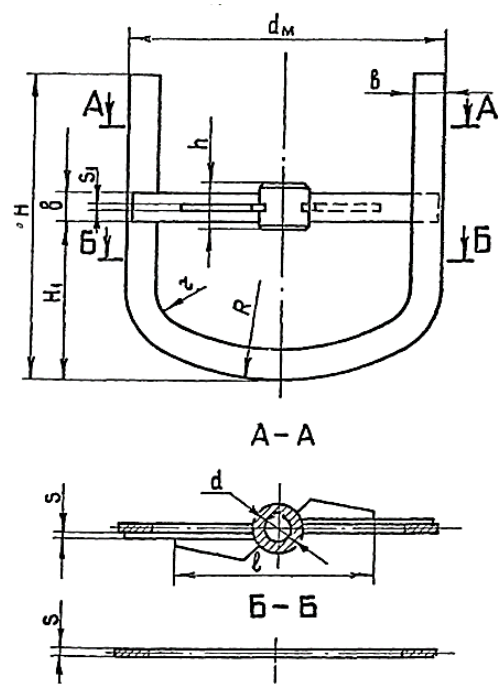

Рис. 5. **Схема рамной мешалки, тип 10[6]: $l = 0{,}7d_м$; $r = 0{,}152d_м$; $R = 0{,}82d_м$; $s_1 = 1{,}2s$**
Fig. 5. **Diagram of gate stirrer, type 10[6]: $l = 0.7d_м$; $r = 0.152d_м$; $R = 0.82d_м$; $s_1 = 1.2s$**

[3]РД 26-01-90–85. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200043740?ysclid=lpky4qxwu8527597254
[4]Там же.
[5]АТК 24.201.17-90. Альбом типовых конструкций. Мешалки. Типы, параметры, конструкция, основные размеры и технические требования. Утверждено Мин-вом тяж. машиностроения СССР от 27.11.90 № ВА-002-1-11125. М., 1991. 32 с. URL: https://gostrf.com/normadata/1/4293831/4293831993.pdf?ysclid=lqbvwsjll1973301013
[6]Там же.

Согласно[7] [22], уменьшение высоты установки мешалки над днищем аппарата способствует подъему твердых частиц, но чрезмерное приближение приводит к увеличению потребляемой мощности. Рекомендованная высота размещения мешалки над днищем:

– (0,5…1,0) $d_м$ при $\Gamma_D \geq 1{,}5$,

– (0,5…5,0) (Γ_D - 1) $d_м$ при $\Gamma_D < 1{,}5$.

где Γ_D – симплекс геометрического подобия (методика расчета дана ниже).

Методика расчета оптимальных параметров перемешивания. Введем основные параметры и определения.

Критерии гидродинамического подобия для процесса перемешивания определяются следующим образом:

1. Критерий Рейнольдса (центробежный):

$$\mathrm{Re}_ц = \frac{\rho_c \cdot n \cdot d_м^{\,2}}{\eta_c}, \qquad (1)$$

где ρ_c – плотность суспензии, кг/м^3; n – частота вращения мешалки, с$^{-1}$; $d_м$ – диаметр мешалки; η_c – динамический коэффициент вязкости суспензии, Па·с.

Критическое значение этого критерия: $\mathrm{Re}_ц^{кр} \approx 80$ – переход от ламинарного к турбулентному режиму (переходная область), развитый турбулентный режим – при $\mathrm{Re}_ц > 1000$.

2. Критерий мощности (центробежный критерий Эйлера):

$$K_N = \frac{N}{\rho_c n^3 d_м^{\,5}}, \qquad (2)$$

где N – мощность, затрачиваемая на перемешивание, Вт.

3. $\Gamma_D = D/d_м$ – симплекс геометрического подобия, характеризующий конструкцию мешалки.

Характеристики аппарата и мешалки:

$d_м$ – диаметр мешалки;

D – внутренний диаметр аппарата;

H – высота заполнения аппарата рабочей средой без перемешивания;

$z_м$ – число мешалок на валу;

ζ – коэффициент сопротивления мешалки;

k_2 – коэффициент циркуляционного расхода.

Расчет основных параметров, характеризующих гидродинамические потоки в процессе перемешивания, произведем, основываясь на нормативной методике РД[8] для турбулентных условий в области чисел Рейнольдса от 10^3 до 10^6. Оценка величин отдельных параметров проводилась с учетом рекомендаций исследований авторов из библиографического списка данной работы – пояснения даны в тексте.

Перенос частиц твердой фазы суспензии в вертикальном (осевом) направлении описывается уравнением:

$$\Delta X_{\max} = \frac{Pe_м}{1 - e^{-Pe_м}} - 1, \qquad (3)$$

где: $\Delta X_{\max} = \max\left[\frac{X(h) - X_{ср}}{X_{ср}}\right]$ – значение относительной разности концентраций взвешенных частиц по высоте аппарата; $X(h)$ – концентрация твёрдой фазы на расстоянии h от днища ферментера; $X_{ср}$ – средняя концентрация твёрдых частиц в аппарате;

$Pe_м$ – модифицированный критерий Пекле, который отражает отношение скорости сепарации частиц под действием силы тяжести к скорости их переноса турбулентной диффузией. Согласно [22], за критическое значение $Pe_м$ можно принимать 0,45, т. е. при $\mathrm{Pe}_м < 0{,}45$ предотвращается осаждение твердых частиц для большинства промышленных применений.

Для случая аппарата (ферментера) без перегородок и других внутренних устройств критерий Пекле будет иметь вид:

$$Pe_м = (w_{oc} - w_2)\frac{H}{D_T}, \qquad (4)$$

где: w_{oc} – скорость осаждения твердых частиц, определяется по формуле:

$$w_{oc} = 1{,}15\sqrt{\frac{d_ч(\rho_m - \rho_ж)g}{\rho_ж}},$$

где: $d_ч$ – средний диаметр частиц; ρ_m, $\rho_ж$ – плотность твёрдой и жидкой фаз суспензии;

D_T – коэффициент турбулентного переноса;

w_2 – скорость восходящего потока перемешиваемой среды определяли:

$$w_2 = \frac{4q}{\pi\left(D^2 - d_м^2 \cdot \bar{r}_m^2\right)}. \qquad (5)$$

В соответствии с диффузионно-циркуляционной моделью при отсутствии в аппарате внутренних устройств формируются две концентрические зоны – центральная и периферийная, которые геометрически характеризуются параметром r_m (радиус раздела зон – расстояние от оси вала мешалки до поверхности

[7]РД 26-01-90–85. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200043740?ysclid=lpky4qxwu8527597254

[8]Там же.

раздела указанных зон). Для мешалок с вертикальными лопастями (якорных, рамных) определяющей является центральная зона, для мешалок с горизонтальными лопастями (лопастных) – периферийная. Перемешивание в каждой из зон осуществляется за счёт турбулентной диффузии, а обмен между ними обеспечивается циркуляцией, диффузия через границу зон не учитывается.

Циркуляционный расход между центральной и периферийной зонами q, а также коэффициенты турбулентного переноса определяются в зависимости от геометрии аппарата:

1) при $\Gamma_D > 1{,}5$ для мешалок с горизонтальными лопастями:

$$D_T = 0{,}318 \cdot n \cdot d_м^2 \cdot \frac{(\Gamma_D - \bar{r}_m)^2}{\Gamma_D^2 - \bar{r}_m^2} \cdot \left[1{,}6\psi_1\left(\bar{r}_m^5 - 1\right) + 1{,}5\psi_2\left(\bar{r}_m^4 - 1\right) + \left(\bar{r}_m^2 - 1\right) + 2\lg \Gamma_D\right] \cdot \left(1 + \psi_1 + \psi_2\right), \quad (6)$$

$$q = k_2 \cdot n \cdot d_м^3 \cdot \exp\left(6{,}9\left(1 + \psi_1 + \psi_2\right)\right); \quad (7)$$

2) при $\Gamma_D \le 1{,}5$ для мешалок с вертикальными лопастями:

$$D_T = 0{,}318 \cdot n \cdot d_м^2 \cdot \bar{r}_m^2 \cdot \left[1{,}6\psi_1 \bar{r}_m^3 + 1{,}5\psi_2 \bar{r}_m^2 + 1\right], \quad (8)$$

$$q = k_2 \cdot n \cdot d_м^3, \quad (9)$$

где: ψ_1 и ψ_2 – параметры профиля окружной скорости жидкости в аппарате (по РД[9]); $\bar{r}_m = 2r_m / d_м$ – относительный радиус раздела зон. Радиус раздела зон r_m равен радиусу максимума окружной скорости жидкости при перемешивании, в точке максимума градиент окружной скорости принимает нулевое значение, соответственно r_m можно определить решением уравнения:

$$\frac{du(r)}{dr} = 4\psi_1 \bar{r}_m^3 + 3\psi_2 \bar{r}_m^2 + 1 = 0. \quad (10)$$

По уравнению (10) определяются корни (значение $\bar{r}_m$), и выбирается наиболее подходящий радиус раздела зон, учитывая рекомендации [22]: $r_m = (0{,}35 \div 0{,}40) d_м$.

Параметры профиля окружной скорости можно найти, используя методику РД[10]. Параметр ψ_1 определяется по экспериментальным графикам в зависимости от параметра гидравлического сопротивления (E), типа выбранной мешалки и Γ_D.

$$E = \frac{\gamma}{\zeta \cdot z_м \cdot \mathrm{Re}_ц^{0{,}25}}, \quad (11)$$

где: γ – параметр высоты заполнения аппарата (ферментера), для аппаратов со свободной поверхностью жидкости и без внутренних перегородок (устройств) рассчитывается:

$$\gamma = (8H / D) + 1.$$

Параметр профиля окружной скорости ψ_2 рассчитывается в зависимости от Γ_D:

1) при $\Gamma_D \ge 1{,}5$: $\Psi_2 = -0{,}5 - 1{,}25 \cdot \Psi_1$, (12)

2) при $\Gamma_D \le 1{,}33$: $\Psi_2 = -u_1 - u_2 \cdot \Psi_1$, (13)

где: u_1 и u_2 – параметры, зависящие от типа мешалки, значения Γ_D можно определить по РД[11] или методике [25]:

1) при $\Gamma_D > 1{,}5$ для мешалок с горизонтальными лопастями:

$$u_1 = 0{,}5, \quad u_2 = 1{,}25, \quad (14)$$

2) при $\Gamma_D \le 1{,}5$ для мешалок с вертикальными лопастями:

$$u_1 = \frac{7\Gamma_D - 6}{21\Gamma_D - 20}; \quad u_2 = \frac{28\Gamma_D - 27}{21\Gamma_D - 20}. \quad (15)$$

Результаты и их обсуждение. Параметры выбранных мешалок, рассчитанные по вышеуказанной методике, представлены в таблице 2.

Для расчета и подбора оптимальных параметров составляли математическую модель в программной среде. Варьировали рабочие параметры в диапазонах, рекомендованных в научных публикациях. Методом обратного счета определяли диаметр мешалки и частоту ее вращения, ориентируясь на значения критерия Пекле и минимизацию величины ΔX_{max}. Согласно [22], рекомендованная величина модифицированного критерия Пекле – менее 0,45, соответственно при $Pe_м < 0{,}45$ предотвращается осаждение твердых частиц суспензии при работе мешалки.

[9]РД 26-01-90-85. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200043740?ysclid=lpky4qxwu8527597254
[10]Там же.
[11]Там же.

Таблица 2 – **Параметры выбранных мешалок и аппарата /**
Table 2 – **Parameters of selected stirrers and fermenter**

Наименование величины, параметра / Name of value, parameter	*Значение для рамной мешалки / Value for gate stirrer*	*Значение для лопастной мешалки / Value for paddle-type stirrer*			*Источник информации / A source of information*
		вариант 1 / variant 1	*вариант 2 / variant 2*	*вариант 3 / variant 3*	
Внутренний диаметр аппарата, D, м / Internal diameter of the fermenter, D, m	1,50	1,50	1,50	1,50	ТУ / TS
Высота заполнения аппарата рабочей средой без перемешивания, H, м / Height of filling the fermenter with working medium without mixing, H, m	1,44	1,44	1,44	1,44	ТУ / TS
Диаметр мешалки, $d_м$, м / Stirrer diameter, $d_м$, m	0,60	0,85	0,85	1,00	расчет, с учетом реком. [23] / calculation GD, [23]
Частота вращения мешалки, n, $с^{-1}$ / Rate of stirrer rotation, n, s^{-1}	0,5	1,0	2,0	0,5	Расчет / Calculation
Число мешалок на валу, $z_м$, шт. / Number of stirrers on the shaft, $z_м$, pieces	1	1	1	1	ТУ / TS
Коэффициент сопротивления мешалки, ζ / Resistance factor of stirrer, ζ	1,28	0,56	0,56	0,56	РД / GD
Коэффициент циркуляционного расхода, k_2 / Circulation flow coefficient, k_2	0,033	0,0028	0,0028	0,0028	РД / GD
Рекомендованная величина Γ_D / Recommended value of Γ_D	1,1…1,3	1,4…2,0 [23] 3…6 РД			РД, [23] / GD, [23]
Тип мешалки / Type of stirrer	Тип 10, рис. 5 / Type 10, fig. 5	Тип 01, наклон лопастей 30°, рис. 4 / Type 01, blade tilt 30°, fig. 4			РД, АТК[12] / GD, ASD[12]
Средний диаметр частиц суспензии, $d_ч$, м / Average particle diameter of dispersion, $d_ч$, m	$0{,}3\cdot10^{-3}$	$80\cdot10^{-6}$	$0{,}3\cdot10^{-3}$	$80\cdot10^{-6}$	Протокол, ТУ / Protocol, TS

Примечания: РД[13]; ТУ – технические условия на биогазовую установку; протокол – результаты исследований проб субстрата физико-химическими методами /
Notes: GD[13]; TS – technical specifications for a biogas plant; protocol – results of studies of substrate samples using physical and chemical methods.

Результаты расчета параметров режима перемешивания приведены в таблице 3

По результатам обзора публикаций для гомогенизации суспензии рекомендована лопастная мешалка периодического действия с наклоном лопастей 30°, с геометрическими параметрами по РД[14] и АТК[15] (рис. 4). Простота изготовления и монтажа является важным ее преимуществом.

В таблице 2 указаны оптимальные диаметры и минимальные частоты вращения лопастных мешалок 1, 2 и 3 вариантов, при которых не допускается осаждение твердой фазы (т. к. $Pe_м$ меньше или близок 0,45).

Расчет скорости осаждения частиц при определении $Pe_м$ для рамной мешалки и лопастной мешалки 2 варианта производили для среднего размера частиц суспензии (субстрата) – 300 мкм, что соответствует результатам исследования субстрата среднему размеру минеральных твердых частиц, обладающих наибольшей плотностью и соответственно большей скоростью осаждения. Для лопастных мешалок 1 и 3 варианта расчет произведен для среднего размера частиц 80 мкм (характеристика целевого продукта по ТУ), то есть подобрана мешалка, позволяющая удерживать во взвешенном состоянии частицы размером

[12]АТК 24.201.17-90. URL: https://gostrf.com/normadata/1/4293831/4293831993.pdf?ysclid=lqbvwsjll1973301013
[13]РД 26-01-90-85. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200043740?ysclid=lpky4qxwu8527597254
[14]Там же
[15]АТК 24.201.17-90. URL: https://gostrf.com/normadata/1/4293831/4293831993.pdf?ysclid=lqbvwsjll1973301013

менее 80 мкм, представляющие собой преимущественно твердую фазу органического происхождения. Но в этом случае минеральная часть будет осаждаться и накапливаться в приямке на дне ферментера, а затем удаляться через патрубок. При расчете режимов перемешивания для лопастной мешалки 3 варианта учтена необходимость снижения частоты вращения, соответственно максимально увеличен диаметр мешалки, при котором еще соблюдаются рекомендованные значения симплекса геометрического подобия (Γ_D).

Таблица 3 – **Результаты расчета параметров перемешивания /**
Table 3 – **Results of calculation of mixing parameters**

Наименование величины, параметра / Name of value, parameter	*Формула / Formula*	*Значение для рамной мешалки / Value for gate stirrer*	*Значение для лопастной мешалки / Value for paddle-type stirrer /*		
			вариант 1 / variant 1	*вариант 2 / variant 2*	*вариант 3 / variant 3*
Число Рейнольдса, $Re_ц$ / Reynolds number, $Re_ц$	(1)	$3{,}2 \cdot 10^5$	$1{,}3 \cdot 10^6$	$2{,}6 \cdot 10^6$	$8{,}8 \cdot 10^5$
Отношение диаметра аппарата к диаметру мешалки, Γ_D / Ratio of plant vessel diameter to stirrer diameter, Γ_D	$\Gamma_D = D/d_м$	2,50	1,76	1,76	1,50
Параметр высоты заполнения, γ / Innage parameter, γ	$\gamma = (8H / D) + 1$	8,68	8,68	8,68	8,68
Параметр гидравлического сопротивления, E / Liquid resistance parameter, E	(11)	0,2853	0,4902	0,4902	0,5051
Параметр профиля окружной скорости, ψ_1 / Contour of tip speed parameter, ψ_1	РД[16] / GD[16]	-0,90	0,20	0,20	0,10
Параметр профиля окружной скорости, ψ_2 / Contour of tip speed parameter, ψ_2	(12), (13)	0,63	-0,75	-0,75	-0,63
Относительный радиус раздела зон, $\bar{r}_m$ / Relative radius of zone separation, $\bar{r}_m$	Корни уравнения (10) / Roots of the equation (10)	0,880	0,785	0,785	0,802
Радиус раздела зон, r_m, м / Radius of zone separation, r_m, m	$\bar{r}_m = 2r_m / d_м$	0,264	0,334	0,334	0,401
Коэффициент турбулентного переноса в осевом направлении, D_T / Turbulent transfer coefficient in the axial direction, D_T	(6), (8)	$3{,}301 \cdot 10^{-2}$	$2{,}315 \cdot 10^{-2}$	$4{,}630 \cdot 10^{-2}$	$1{,}003 \cdot 10^{-2}$
Циркуляционный расход, q / Circulatory rate, q	(7), (9)	$3{,}564 \cdot 10^{-3}$	$3{,}757 \cdot 10^{-2}$	$7{,}513 \cdot 10^{-2}$	$3{,}630 \cdot 10^{-2}$
Скорость восходящего потока, w_2, м/с / Upward velocity, w_2, m/s	(5)	$2{,}303 \cdot 10^{-3}$	$2{,}652 \cdot 10^{-2}$	$5{,}303 \cdot 10^{-2}$	$2{,}878 \cdot 10^{-2}$
Скорость осаждения твердых частиц, w_{oc}, м/с / Sedimentation rate of solid particles, w_{oc}, m/s	(4)	$6{,}216 \cdot 10^{-2}$	$3{,}210 \cdot 10^{-2}$	$6{,}216 \cdot 10^{-2}$	$3{,}210 \cdot 10^{-2}$
Модифицированный критерий Пекле, $Pe_м$ / Modified Peclet criterion, $Pe_м$	(4)	2,61	0,35	0,28	0,48
Перенос частиц твердой фазы суспензии в вертикальном (осевом) направлении, ΔX_{max} / Transfer of solid phase particles in the vertical direction, ΔX_{max}	(3)	1,82	0,19	0,16	0,26

[16]РД 26-01-90–85. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200043740?ysclid=lpky4qxwu8527597254

Максимальное снижение частоты вращения мешалки вызвано требованием минимизации воздействия на экосистему микроорганизмов в ферментере. Для поиска оптимального значения частоты вращения были построены расчетные зависимости, изображенные на рисунке 6, при различных значениях Γ_D (1,5; 2; 3). В качестве компромиссных можно определить значения в диапазоне 0,3…0,5 об/с (изгиб кривой), при которых значения критерия Пекле незначительно отличаются от рекомендованного 0,45. К сожалению, на данный момент нет однозначной информации о влиянии высокой частоты вращения мешалки, а точнее о возникающих интенсивных турбулентных потоках у поверхности лопастей, на жизнедеятельность микроорганизмов субстрата. Низкие скорости вращения лопастей позволяют уменьшить их негативное воздействие на микробиоценозы, но могут приводить к образованию осадка и корки на поверхности.

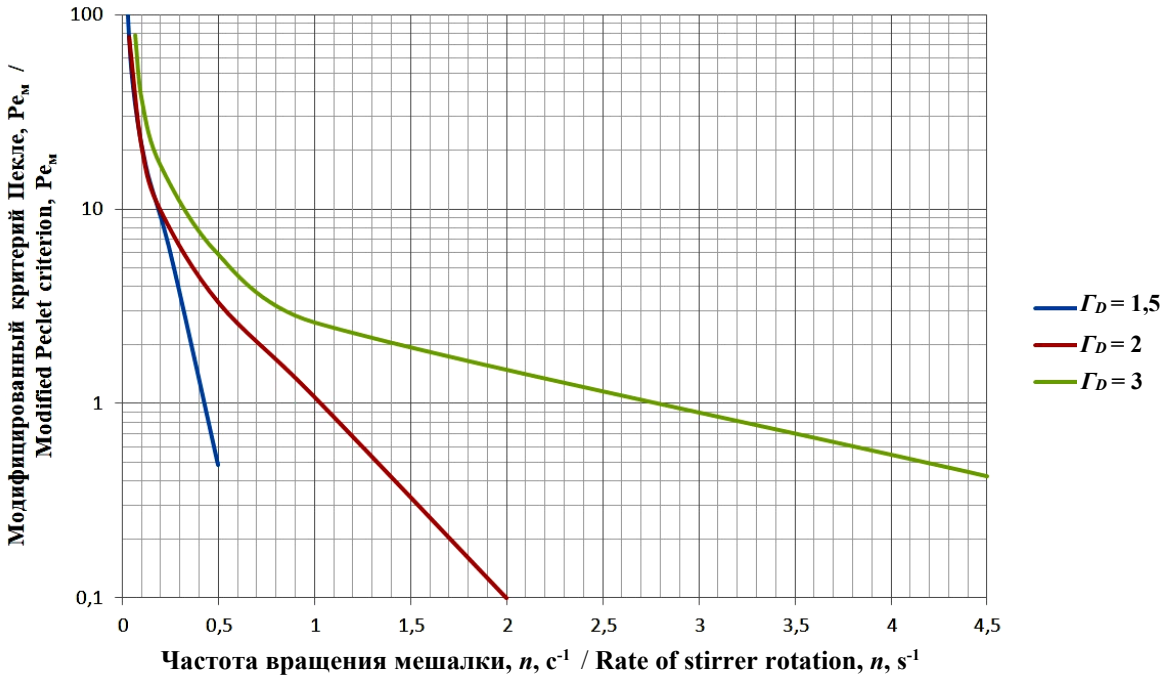

Рис. 6. **Зависимость величины критерия Пекле от частоты вращения мешалки при различных значениях Γ_D (в логарифмических координатах, расчетные данные) /**

Fig. 6. **Dependence of Peclet ($Pe_м$) criterion on the stirrer rotation speed for different values of Γ_D (in logarithmic coordinates, calculated data)**

Проводя сравнение расчетных параметров процесса для лопастных мешалок и рамной мешалки, фактически установленной в аппарате, можно видеть, что рамная мешалка не обеспечивает эффективного перемешивания в части гомогенизации суспензии – $Pe_м = 2{,}61$, $\Delta X_{max} = 1{,}82$, но значения указанных параметров незначительно отличаются от оптимальных. Кроме того, установленная рамная мешалка не соответствует рекомендованным[17] [23] значениям параметра Γ_D. Дополнительно сравним потребление электрической мощности рамной мешалкой и рекомендованными лопастными мешалками.

Расчет потребляемой мощности производили с использованием критерия мощности по формуле (2) с учетом рекомендаций и графических материалов РД[18]. Для типовых конструкций мешалок используем графические зависимости критерия мощности от числа Рейнольдса, полученные на основе данных широкомасштабного эксперимента. Расчет мощности, *непосредственно потребляемой при перемешивании*, показал, что рамной мешалке требуется 3,5 Вт, лопастным 1, 2, 3 вариантов – 38,2; 305,7 и 9,4 Вт соответственно.

Для определения периодичности включения мешалки проводили отстаивание проб субстрата в лабораторных условиях в цилиндрической делительной воронке. Через определенные промежутки времени отбирали пробы

[17]РД 26-01-90–85. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200043740?ysclid=lpky4qxwu8527597254
[18]Там же

осветленной жидкости и анализировали на содержание взвешенных веществ и сухого остатка. Суммарное содержание взвешенных веществ и сухого остатка определялось гравиметрическим методом при выпаривании известного объема анализируемой пробы субстрата и высушивании до постоянной массы при температуре 95 °С.

Изменение концентрации твердой фазы в осветленном субстрате происходит в первый час, в дальнейшем изменения незначительные. В первый час происходит, в основном, осаждение *минеральной части* субстрата (остаток после прокаливания твердого осадка при 1000 °С), т. к. частицы имеют бóльшую плотность. Органическая часть твердой фазы в течение 24 часов лабораторного эксперимента практически не осаждается, т. к. представляет собой преимущественно коллоидные частицы.

Расчетная скорость осаждения частиц размером 300 мкм составляет $6{,}216 \cdot 10^{-2}$ м/с, частиц 80 мкм – $3{,}210 \cdot 10^{-2}$ м/с (табл. 3). Так как высота заполнения ферментера 1,44 м, то в среднем частицы проходят весь путь осаждения: 300 мкм – за 23,2 с, 80 мкм – за 44,9 с (табл. 4). Расчетная скорость плохо учитывает агрегацию частиц в условиях ферментера и реальную геометрию осаждаемых частиц – отличие от сферической формы. Соответственно реальное время осаждения частиц немного вышеуказанного.

Аналогично, по рассчитанным значениям скорости восходящего потока (табл. 3), можно оценить наибольшее время гомогенизации суспензии от запуска мешалки – время прохождения частицей пути 1,44 м (табл. 4). Можно видеть, что лопастные мешалки с наклоном лопастей 30° обеспечивают подъем твердых частиц с днища в течение менее 1 минуты, рамной мешалке требуется в 11,5 раза больше времени.

При рассчитанных условиях перемешивания гомогенизация суспензии (субстрата) достигается менее чем за 1 минуту, без учета времени стабилизации гидродинамических условий в аппарате после пуска.

Таблица 4 – **Данные для оценки периодичности включения мешалки /**
Table 4 – **Data for assessing the frequency of stirrer activation**

Наименование величины, параметра / Name of value, parameter	*Значение для рамной мешалки / Value for gate stirrer*	*Значение для лопастной мешалки / Value for paddle-type stirrer*		
		вариант 1 / variant 1	*вариант 2 / variant 2*	*вариант 3 / variant 3*
Скорость восходящего потока, w_2, м/с / Upward velocity, w_2, m/s	$2{,}303 \cdot 10^{-3}$	$2{,}652 \cdot 10^{-2}$	$5{,}303 \cdot 10^{-2}$	$2{,}878 \cdot 10^{-2}$
Наибольшее время гомогенизации, с / Longest homogenisation time, s	625,3	54,3	27,2	50,0
Скорость осаждения твердых частиц, w_{oc}, м/с / Sedimentation rate of solid particles, w_{oc}, m/s	$6{,}216 \cdot 10^{-2}$	$3{,}210 \cdot 10^{-2}$	$6{,}216 \cdot 10^{-2}$	$3{,}210 \cdot 10^{-2}$
Наибольшее время осаждения, с / Longest sedimentation time, s	23,2	44,9	23,2	44,9

Перемешивание в ферментере выполняет несколько функций, включающих кроме поддержания твердых частиц во взвешенном состоянии, также распределение в массе свежей порции субстрата, распределение тепла и питательных веществ по объему, обеспечение выделения биогаза. Это приводит к увеличению времени работы мешалки и необходимости экспериментального исследования процесса перемешивания на модельной установке.

Заключение. С целью оптимизации режимов перемешивания и подбора более эффективной мешалки для ферментеров действующей биогазовой установки были решены следующие задачи:

– произведен отбор проб субстрата из ферментера БГУ, проведены лабораторные исследования комплексом физико-химических методов, определены, в том числе, механические характеристики субстрата, позволяющие математически моделировать процесс перемешивания;

– на основе научных публикаций и опыта эксплуатации установки подобран тип мешалки для данной конструкции ферментера – трехлопастная мешалка периодического действия с углом наклона лопастей 30°;

– с учетом современных исследований модифицирована методика расчета геометрии мешалки и режимов перемешивания, на основе которой подобраны три варианта лопастных

мешалок, отличающиеся размером рабочего колеса и частотой вращения; модификация заключается в совмещении известного метода расчета геометрии мешалки (и режимов перемешивания) и критериев эффективности (ΔX_{max}, $Pe_м$), а также в расширении диапазонов критериев гидродинамического подобия (Γ_D, $Re_ц$) под условия биогазового ферментера;

– построена графическая зависимость критерия Пекле от частоты вращения мешалки для условий данного ферментера, позволяющая определить частоту вращения мешалки без существенного снижения эффективности по гомогенизации суспензии;

– на основе лабораторного эксперимента и результатов расчета скорости осаждения определена периодичность включения мешалки (1 раз в сутки) и время ее непрерывной работы для гомогенизации суспензии (около 1 минуты) при условии возможного образования *минерального* осадка на дне ферментера и необходимости периодического удаления.

Список литературы

1. Руководство по биогазу. От получения до использования: проект. Агентство по возобновляемым ресурсам (FNR), перев. с немецкого, 5-е издание, перераб. Германия, Гюльцов, 2010. 213 с. Режим доступа: https://rnei.de/wp-content/uploads/2013/09/handreichungbiogasru2012.pdf

2. Шаяхметов Р. Г., Исаков В. Г., Ефремов С. М. Опыт применения программного комплекса ANSYS WORKBENCH для моделирования процессов перемешивания в метантенках. Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2013;(3(59)):127–131. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20281318 EDN: RBVFMX

3. Веденев А. Г., Маслов А. Н. Строительство биогазовых установок: краткое руководство. Бишкек: «Евро», 2006. 28 с. Режим доступа: https://www.studmed.ru/view/vedenev-ag-maslov-an-stroitelstvo-biogazovyh-ustanovok_bc5b8a6d035.html?ysclid=lpl488nbcd833612647

4. Rico C., Rico J. L., Muñoz N., Gómez B., Tejero I. Effect of mixing on biogas production during mesophilic anaerobic digestion of screened dairy manure in a pilot plant. Engineering in Life Sciences. 2011;11(5):476–481. DOI: https://doi.org/10.1002/elsc.201100010

5. Суслов Д. Ю. Перемешивание биомассы в биореакторе получения биогаза. Эпоха науки. 2015;(4):444–447. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25429518 EDN: VKMIHV

6. Караева Ю. В. Модифицированная система гидравлического перемешивания в метантенке биогазовой установки. Вестник Казанского технологического университета. 2013;(1):199–201. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18726019 EDN: PTUICZ

7. Караева Ю. В., Халитова Г. Р., Трахунова И. А. Установка анаэробной переработки органических отходов: Полезная модель к пат. №115350 Российская Федерация. № 2011124487/05; заявл. 16.06.2011; опубл. 27.04.2012. Бюл. 12. 2 с. Режим доступа: https://fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet

8. Lindmark J., Thorin E., Fdhila R. B., Dahlquist E. Effects of mixing on the result of anaerobic digestion: Review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014;40:1030–1047. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.182

9. Качан Ю. Г., Курис Ю. В., Левицкая И. Н. Процессы перемешивания субстрата в реакторе биогазовой установки. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2009;2(4(38)):4–8. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23126841 EDN: TMCFAV

10. Conti F., Saidi A., Goldbrunner M. Numeric simulation-based analysis of the mixing process in anaerobic digesters of biogas plants. Chemical Engineering & Technology. 2020;43(8):1522–1529. DOI: https://doi.org/10.1002/ceat.201900650

11. Karim K., Hoffmann R., Klasson T., Al-Dahhan M. H. Anaerobic digestion of animal waste: waste strength versus impact of mixing. Bioresourse Technology. 2005;96(16):1771–1781. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.01.020

12. Шаяхметов Р. Г. Опыт применения программного комплекса ANSYS для моделирования процессов перемешивания животноводческих стоков в биореакторах. Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. 2016;(4(24)):176–180.

13. Ямпилов С. С., Кобякова Е. Н., Друзьянова В. П. Обоснование применения перемешивающего устройства в биогазовой установке для малых животноводческих хозяйств. Вестник ВСГУТУ. 2014;(4):13–19. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21988009 EDN: SNEGKN

14. Wiedemann L., Conti F., Saidi A., Sonnleitner M., Goldbrunner M. Modeling mixing in anaerobic digesters with computational fluid dynamics validated by experiments. Chemical Engineering Technology. 2018;41(11):2101–2110. DOI: https://doi.org/10.1002/ceat.201800083

15. Рубцов А. А., Заушинцена А. В. Технология получения органического удобрения из отходов животноводства. Аграрная наука –сельскохозяйственному производству Сибири, Монголии, стран СНГ и BRICS: сб. научн. докл. XXV юбилейного международного научно-практического форума (г. Новосибирск, 29 ноября 2022 г.). Новосибирск: СФНЦА РАН, 2023. С. 62–64.

16. Vavilin V. A., Angelidaki I. Anaerobic degradation of solid material: importance of initiation centers for methanogenesis, mixing intensity, and 2D distributed model. Biotechnology and Bioengineering. 2005;89(1):113–122. DOI: https://doi.org/10.1002/bit.20323

17. Vavilin V. A., Lokshina L. Y., Flotats X., Angelidaki I. Anaerobic digestion of solid material: multidimensional modeling of continuous-flow reactor with nonuniform influent concentration distributions. Biotechnology and Bioengineering. 2007;97(2):354–366. DOI: https://doi.org/10.1002/bit.21239

18. Keshtkar A., Meyssami B., Abolhamd G., Ghaforian H., Khalagi Asadi M. Mathematical modeling of non-ideal mixing continuous flow reactors for anaerobic digestion of cattle manure. Bioresource Technology. 2003;87(1):113–124. DOI: https://doi.org/10.1016/s0960-8524(02)00104-9

19. Huber B., Krebs G. J., Putra L. A., Gaderer M. Positioning a measurement system for determining the mixing quality in biogas digesters. Chemical Engineering & Technology. 2023;46(10):2154–2166. DOI: https://doi.org/10.1002/ceat.202300241

20. Kress P., Nagele H.-J., Lemmer A., Kolb B. Flow velocities and flow profiles in a thoroughly mixed biogas fermenter. LANDTECHNIK. 2020;75(2):35–50. DOI: https://doi.org/10.15150/lt.2020.3230

21. Кононов В. Н., Рубцов А. А. Биореактор модульный: пат. № 2747414 Российская Федерация. № 2020122799: заяв. 03.07.2020; опубл. 04.05.2021. Бюл. № 13. 9 с. Режим доступа: https://fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet

22. Брагинский Л. Н., Бегачёв В. И., Барабаш В. М. Перемешивание в жидких средах: физические основы и инженерные методы расчета. Л.: Химия, 1984. 336 с. Режим доступа: https://www.studmed.ru/braginskiy-ln-peremeshivanie-v-zhidkih-sredah_1736bb6c817.html?ysclid=lpl49sgvv4707714778

23. Барабаш В. М., Абиев Р. Ш., Кулов Н. Н. Обзор работ по теории и практике перемешивания. Теоретические основы химической технологии. 2018;52(4):367–383. DOI: https://doi.org/10.1134/S0040357118040024 EDN: XWLKMX

24. Барабаш В. М., Бегичев В. И., Белевицкая М. А., Смирнов Н. Н. Проблемы и тенденции развития теории и практики перемешивания жидких сред. Теоретические основы химической технологии. 2007;41(2):140–147. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9495369 EDN: HFAFQM

25. Карпушкин С. В., Краснянский М. Н., Афанасьева Н. Н. Система выбора конструкции механического перемешивающего устройства вертикального емкостного аппарата. Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2005;11(2):423–231. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11897394 EDN: KAJCYT

References

1. A guide to biogas. From receipt to use: the project. Renewable Resources Agency (FNR), transl. from the German, 5th edition, revised. Germaniya, Gyul'tsov, 2010. 213 p. URL: https://rnei.de/wp-content/uploads/2013/09/handreichungbiogasru2012.pdf

2. Shayakhmetov R. G., Isakov V. G., Efremov S. M. Experience of software ANSYS WORKBENCH application for simulation of mixing processes in digesters. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*. 2013;(3(59)):127–131. (In Russ.). URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20281318

3. Vedenev A. G., Maslov A. N. Construction of biogas plants: a quick guide. Bishkek: *«Evro»*, 2006. 28 p. URL: https://www.studmed.ru/view/vedenev-ag-maslov-an-stroitelstvo-biogazovyh-ustanovok_bc5b8a6d035.html?ysclid=lpl488nbcd833612647

4. Rico C., Rico J. L., Muñoz N., Gómez B., Tejero I. Effect of mixing on biogas production during mesophilic anaerobic digestion of screened dairy manure in a pilot plant. Engineering in Life Sciences. 2011;11(5):476–481. DOI: https://doi.org/10.1002/elsc.201100010

5. Suslov D. Yu. Mixing the biomass in the bioreactor biogas. *Epokha nauki*. 2015;(4):444–447. (In Russ.). URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25429518

6. Karaeva Yu. V. Modified hydraulic mixing system in the methane tank of a biogas plant. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2013;(1):199–201. (In Russ.). URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18726019

7. Karaeva Yu. V., Khalitova G. R., Trakhunova I. A. Installation of anaerobic processing of organic waste: Utility model for patent RF no. 115350. 2012. URL: https://fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet

8. Lindmark J., Thorin E., Fdhila R. B., Dahlquist E. Effects of mixing on the result of anaerobic digestion: Review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014;40:1030–1047. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.182

9. Kachan Yu. G., Kuris Yu. V., Levitskaya I. N. Substrate mixing processes in a biogas plant reactor. *Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy* = Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2009;2(4(38)):4–8. (In Ukraine). URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23126841

10. Conti F., Saidi A., Goldbrunner M. Numeric simulation-based analysis of the mixing process in anaerobic digesters of biogas plants. Chemical Engineering & Technology. 2020;43(8):1522–1529. DOI: https://doi.org/10.1002/ceat.201900650

11. Karim K., Hoffmann R., Klasson T., Al-Dahhan M. H. Anaerobic digestion of animal waste: waste strength versus impact of mixing. Bioresourse Technology. 2005;96(16):1771–1781. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.01.020

12. Shayakhmetov R. G. Experience of ANSYS software using for livestock runoff's mixing processes modeling. *Vestnik Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta mekhanizatsii zhivotnovodstva*. 2016;(4(24)):176–180. (In Russ.).

13. Yampilov S. S., Kobyakova E. N., Druzyanova V. P. A rationale for the mixer in biogas plants for small livestock farms. *Vestnik VSGUTU* = The Bulletin of ESSTUM. 2014;(4):13–19. (In Russ.).
URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21988009

14. Wiedemann L., Conti F., Saidi A., Sonnleitner M., Goldbrunner M. Modeling mixing in anaerobic digesters with computational fluid dynamics validated by experiments. Chemical Engineering Technology. 2018;41(11):2101–2110. DOI: https://doi.org/10.1002/ceat.201800083

15. Rubtsov A. A., Zaushintsena A. V. The technology of obtaining organic fertilizer from animal husbandry waste. Agricultural Science to agricultural production of Siberia, Mongolia, CIS countries and BRICS: collection of scientific reports of the XXV anniversary International Scientific and Practical Forum (Novosibirsk, November 29, 2022). Novosibirsk: *SFNTsA RAN*, 2023. pp. 62–64.

16. Vavilin V. A., Angelidaki I. Anaerobic degradation of solid material: importance of initiation centers for methanogenesis, mixing intensity, and 2D distributed model. Biotechnology and Bioengineering. 2005;89(1):113–122. DOI: https://doi.org/10.1002/bit.20323

17. Vavilin V. A., Lokshina L. Y., Flotats X., Angelidaki I. Anaerobic digestion of solid material: multidimensional modeling of continuous-flow reactor with nonuniform influent concentration distributions. Biotechnology and Bioengineering. 2007;97(2):354–366. DOI: https://doi.org/10.1002/bit.21239

18. Keshtkar A., Meyssami B., Abolhamd G., Ghaforian H., Khalagi Asadi M. Mathematical modeling of non-ideal mixing continuous flow reactors for anaerobic digestion of cattle manure. Bioresource Technology. 2003;87(1):113–124. DOI: https://doi.org/10.1016/s0960-8524(02)00104-9

19. Huber B., Krebs G. J., Putra L. A., Gaderer M. Positioning a measurement system for determining the mixing quality in biogas digesters. Chemical Engineering & Technology. 2023;46(10):2154–2166.
DOI: https://doi.org/10.1002/ceat.202300241

20. Kress P., Nagele H.-J., Lemmer A., Kolb B. Flow velocities and flow profiles in a thoroughly mixed biogas fermenter. LANDTECHNIK. 2020;75(2):35–50. DOI: https://doi.org/10.15150/lt.2020.3230

21. Kononov V. N., Rubtsov A. A. Modular bioreactor: Patent RF no. 2747414. 2021.
URL: https://fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet

22. Braginskiy L. N., Begachev V. I., Barabash V. M. Mixing in liquid media: physical foundations and engineering calculation methods. Leningrad: *Khimiya,* 1984. 336 p. URL: https://www.studmed.ru/braginskiy-ln-peremeshivanie-v-zhidkih-sredah_1736bb6c817.html?ysclid=lpl49sgvv4707714778

23. Barabash V. M., Abiev R. Sh., Kulov N. N. Theory and practice of mixing: a review. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoy tekhnologii*. 2018;52(4):367–383. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.1134/S0040357118040024

24. Barabash V. M., Begichev V. I., Belevitskaya M. A., Smirnov N. N. Problems and trends in the development of the theory and practice of mixing of fluid media. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoy tekhnologii*. 2007;41(2):140–147. (In Russ.). URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9495369

25. Karpushkin S. V., Krasnyanskiy M. N., Afanas'eva N. N. The system of selecting design of a mechanical mixing unit of a vertical vessels. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2005;11(2):423–231. (In Russ.). URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11897394

Сведения об авторах

Рубцов Александр Алексеевич, аспирант, ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», д. 6, ул. Красная, г. Кемерово, Российская Федерация, 650000, e-mail: rector@kemsu.ru,
ORCID: https://orcid.org/0009-0008-5989-8165

✉ **Немущенко Дмитрий Андреевич**, старший преподаватель кафедры инженерных проблем экологии, **ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»,** д. 20, пр-т Карла Маркса, г. Новосибирск, Российская Федерация, 630087, e-mail: rector@nstu.ru,
ORCID: https://orcid.org/0009-0000-8262-237X**,** e-mail: nemuschenko@corp.nstu.ru

Information about the authors

Aleksandr A. Rubcov, post-graduate student, Kemerovo State University, 6, st. Krasnaya, Kemerovo, Russian Federation, 650000, e-mail: rector@kemsu.ru, **ORCID: https://orcid.org/0009-0008-5989-8165**

✉ **Dmitriy A. Nemuschenko,** senior lecturer, the Department of Engineering Problems of Ecology, Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, Russian Federation, 630073,
e-mail: rector@nstu.ru, **ORCID: https://orcid.org**/0009-0000-8262-237X**,** e-mail: nemuschenko@corp.nstu.ru

✉ – Для контактов / Corresponding author

ЮБИЛЕЙ УЧЕНОГО
Юнусову Губейдулле Сибяттуловичу – 80 лет!

27 января 2024 года 80-летний юбилей отметил Губейдулла Сибяттулович Юнусов – доктор технических наук, профессор кафедры агроинженерии и технологии производства, переработки сельскохозяйственной продукции Аграрно-технологического института Марийского ГУ, заслуженный работник сельского хозяйства Республики Марий Эл, заслуженный работник высшей школы РФ, член редакционного совета научного журнала «Аграрная наука Евро-Северо-Востока»..

Губейдулла Сибятуллович родился в д. Помыткино Советского района Кировской области в крестьянской семье. После окончания Сернурской средней школы поступил учиться в Йошкар-Олинский техникум механизации сельского хозяйства, получил специальность «техник-механик» и был направлен на работу в Сернурскую РТС помощником бригадира тракторной бригады.

В 1971 году, после окончания факультета механизации сельскохозяйственного производства Казанского сельскохозяйственного института, работал главным инженером в Сернурском управлении сельского хозяйства.

С 1973 по 1975 год Г. С. Юнусов преподавал в Йошкар-Олинском совхозе-техникуме. В 1975 году Министерство сельского хозяйства республики предложило ему должность главного инженера-инспектора Госсельхознадзора.

В 1982 году Губейдулла Сибяттулович назначен на должность зам. министра сельского хозяйства Марийской АССР по механизации, электрификации и диспетчеризации. В этот период была проделана в республике огромная работа, связанная с механизацией сельскохозяйственных процессов. В частности, был осуществлен переход на широкозахватные агрегаты, механизацию процессов доения, раздачи кормов, удаления навоза на фермах.

В 1988 году Ю. Г. Юнусов по конкурсу поступил на работу в Марийский государственный университет на должность доцента кафедры механизации и электрификации сельского хозяйства. С 1998 по 1999 год – заведующий этой кафедрой. В 2000 году Губейдулла Сибятуллович избран деканом аграрно-технологического факультета, а после реорганизации факультета назначен директором Аграрно-технологического института.

В 1988 году он поступил в аспирантуру Всероссийского научно-исследовательского института механизации и в 1991 году успешно защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук, в 2005 году – доктора технических наук.

Сфера научных интересов Г. С. Юнусова направлена на совершенствование технологий и технических средств поверхностной обработки почвы, разработку технологий возделывания зерновых культур, интенсификацию процессов переработки сельскохозяйственной продукции.

С 2008 г. по настоящее время Г. С. Юнусов является профессором кафедры механизации, производства и переработки сельскохозяйственной продукции МарГУ, продолжает заниматься научными исследованиями по совершенствованию комбинированных почвообрабатывающих агрегатов с целью сокращения сроков проведения работ, снижения энергозатрат, повышения урожайности возделываемых культур.

Г. С. Юнусов уделяет большое внимание написанию и изданию учебно-методической и научной литературы. Он – автор более 300 научных работ и соавтор шести учебных пособий. Профессор Г. С. Юнусов подготовил пять кандидатов технических наук, у 15 диссертантов выступал оппонентом.

Г. С. Юнусов в разные годы являлся членом трех диссертационных советов: Д 220.070.01 при ФГОУ ВПО Чувашская СХА, ДМ 212.116.02 при ГОУ ВПО Марийский ГУ по сельскохозяйственным наукам, Д.006.048 при ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока.

За свою инициативность, деловитость, принципиальность, профессионализм и многолетний добросовестный труд Г. С. Юнусову присвоено звание лауреата Государственной премии Республики Марий Эл в области сельскохозяйственного производства, он награжден почетными грамотами Министерства образования Российской Федерации, Республики Марий Эл за вклад в дело подготовки высококвалифицированных специалистов, МарГУ за научную работу со студентами.

Среди многих прочих наград, медалей, почетных грамот, дипломов, званий, есть главные – благодарность учеников и уважение коллег!

Поздравляем Губейдуллу Сибяттуловича с юбилеем!
Выражаем признательность за многолетнее сотрудничество.
Будьте здоровы, востребованы, активны!

ЮБИЛЕЙ УЧЕНОГО
Вацлаву Романюку – 85 лет!

22 февраля 2024 года исполнилось 85 лет Вацлаву Романюку – хабилитированному доктору технических наук, профессору Института Технологических и Естественных наук, члену редакционного совета журнала «Аграрная наука Евро-Северо-Востока».

В. Романюк родился в д. Кживовежба Люблинского воеводства Польши. В 1965 г. окончил факультет сельскохозяйственных машин Варшавского технического университета, получив квалификацию магистр, инженер-механик.

С 1966 года профессиональная деятельность связана с Институтом строительства, механизации и электрификации сельского хозяйства (с 2010 г. – Технолого-природоведческий институт, гг. Варшава – Фаленты, в настоящее время – Институт Технологических и Естественных наук). Он прошел путь от младшего научного сотрудника до ученого секретаря института и руководителя отдела механизации животноводства.

В 1979 году В. Романюк защитил кандидатскую, в 1997 году – докторскую диссертации. Ученое звание профессора ему присвоено в 2001 году. Ряд лет работал в Западнопоморском Технологическом Университете в Щецине в должности профессора кафедры эксплуатации машин и оборудования.

Неоднократно проходил повышение квалификации в Швеции и Франции.

Сферами научных интересов профессора В. Романюка являются: разработка технологий и технических средств в животноводстве и кормопроизводстве, получение биогаза из отходов сельскохозяйственного производства; повышение надежности при эксплуатации сельскохозяйственной техники, улучшение условий труда, сельскохозяйственное строительство.

В. Романюк – автор более 500 научных и научно-популярных статей, 30 книг, патентов и монографий. Под его руководством 10 аспирантов и соискателей успешно защитили диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук.

За существенный вклад в развитие сельскохозяйственного производства Вацлав Романюк удостоен 4 премий Министерства сельского хозяйства Польши.

До 2018 года профессор В. Романюк являлся главным организатором и председателем 24 Международных научных конференций «Проблемы интенсификации продукции животноводства с учетом охраны окружающей среды», проводимых ежегодно в сентябре месяце в г. Варшава.

С 1990 года – ежегодный участник научных конференций в России, Украине, Беларуси, Литве, выставок World Trade Paris SIMA - SIMAGENA во Франции. С этого времени он активно сотрудничает, в частности, с учеными Федерального аграрного научного центра Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого, с которыми проводит совместные исследования, оказывает помощь в публикации результатов за рубежом, является членом редсовета нескольких авторитетных российских научных журналов.

Поздравляем Вацлава Романюка с юбилеем!
Выражаем признательность за многолетнее плодотворное сотрудничество.
Желаем здоровья, долгих лет жизни, новых научных свершений!

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

Лаборатория биотехнологии растений и микроорганизмов

Лекарственный гриб Герициум гребенчатый (*Hericium erinaceus*)

Съедобный гриб, обладающий лекарственными противоопухолевыми и иммуностимулирующими свойствами.

Зимний опёнок (*Flammulina velutipes*)

Съедобный гриб, способный разрушать целлюлозосодержащие отходы сельскохозяйственного производства.

ISSN 2072-9081 (print) Аграрная наука Евро-Северо-Востока, Том 25, № 1, 2024.
ISSN 2500-1396 (online) Agricultural Science Euro-North-East, Vol. 25, no.1, 2024.