

ISSN 2078–1318

**ИЗВЕСТИЯ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
АГРАРНОГО УНИВЕРСИТЕТА**

№ 3 (77)

**IZVESTIYA
SAINT-PETERSBURG STATE
OF AGRARIAN UNIVERSITY**

2024

ИЗВЕСТИЯ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
АГРАРНОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 3 (77)

IZVESTIYA
OF SAINT-PETERSBURG STATE
AGRARIAN UNIVERSITY

2024

**ИЗВЕСТИЯ САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО АГРАРНОГО УНИВЕРСИТЕТА**

Рецензируемый научный журнал
4 номера в год
№ 3 (77)

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства
в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия
Свидетельство о регистрации средства массовой информации
ПИ № ФС77-26051 от 18 октября 2006 г.

Журнал входит в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий,
рекомендованных ВАК РФ для публикации результатов кандидатских
и докторских исследований

Журнал содержит материалы по основным разделам аграрной науки.
В нем представлены результаты научных исследований и внедрения разработок
в сельскохозяйственное производство
Издаётся с 2004 г.

Учредитель – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет»

IZVESTIYA OF SAINT-PETERSBURG STATE AGRARIAN UNIVERSITY

Peer-reviewed scientific journal
4 issues per year
№ 3 (77)

Journal is registered
in the Federal service on supervision for legislation compliance in the sphere
of mass communications and cultural heritage protection
The registration certificate of mass media
ПИ № FS77-26051 on October 18, 2006

The journal is included into the list of leading reviewed scientific journals and publications recommended
by the Higher Certification Commission of RF for the results publication of candidate
and doctoral research papers

Journal contains materials on main sections of agricultural science.
It presents research results and development implementation results into agricultural production

Published since 2004

Founder – Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Saint-Petersburg
State Agrarian University"

© Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, 2024

ИЗВЕСТИЯ САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО АГРАРНОГО УНИВЕРСИТЕТА

Рецензируемый научный журнал
4 номера в год
№ 3 (77)

Главный редактор
Морозов Виталий Юрьевич
Доктор ветеринарных наук, профессор, ректор

Заместитель главного редактора
Колесников Роман Олегович
Кандидат ветеринарных наук, проректор
по научной, инновационной и международной работе

Ответственный секретарь
Мельникова Дарья Андреевна
Кандидат исторических наук

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Атрощенко Геннадий Парфёнович, доктор сельскохозяйственных наук, доцент, профессор кафедры плодовоовощеводства и декоративного садоводства ФГБОУ ВО СПбГАУ;

Афанасенко Ольга Сильвестровна, академик Российской академии наук, доктор биологических наук, профессор, заведующая лабораторией иммунитета растений к болезням ФГБНУ ВИЗР;

Беззубцева Марина Михайловна, доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой энергообеспечения предприятий и электротехнологий ФГБОУ ВО СПбГАУ;

Болгов Анатолий Ефремович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, профессор кафедры зоотехнии, рыбоводства, агрономии и землеустройства ФГБОУ ВО ПетрГУ;

Брюханов Александр Юрьевич, доктор технических наук, доцент, член-корреспондент Российской академии наук, директор ИАЭП – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ;

Ганусевич Фёдор Фёдорович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий кафедрой растениеводства им. И.А. Стебута ФГБОУ ВО СПбГАУ;

Гаспарян Ирина Николаевна, доктор сельскохозяйственных наук, доцент, профессор кафедры эксплуатации машинно-тракторного парка и высоких технологий в растениеводстве ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА им. К.А. Тимирязева;

Долженко Виктор Иванович, академик Российской академии наук, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, руководитель Центра биологической регламентации использования пестицидов ФГБНУ ВИЗР;

Долженко Татьяна Васильевна, доктор биологических наук, доцент, доцент кафедры защиты и карантина растений ФГБОУ ВО СПбГАУ;

Донских Нина Александровна, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий кафедрой земледелия и луговодства ФГБОУ ВО СПбГАУ;

Епимахова Елена Эдугартовна, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, профессор базовой кафедры частной зоотехнии, селекции и разведения животных ФГБОУ ВО Ставропольский ГАУ;

Иванов Алексей Иванович, член-корреспондент Российской академии наук, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, главный научный сотрудник, заведующий отделом физико-химической мелиорации и опытного дела ФГБНУ АФИ;

Карташевич Анатолий Николаевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой тракторов, автомобилей и машин для природоустройства УО «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия»;

Киру Степан Димитрович, доктор биологических наук, профессор кафедры растениеводства им. И.А. Стебута ФГБОУ ВО СПбГАУ;

Лаврищев Антон Викторович, доктор сельскохозяйственных наук, доцент, заведующий кафедрой почвоведения и агрохимия им. Л.Н. Александровой ФГБОУ ВО СПбГАУ;

Лаптев Георгий Юрьевич, доктор биологических наук, директор ООО «Биотроф»;

Левшин Александр Григорьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой эксплуатации машинно-тракторного парка и высоких технологий в растениеводстве ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА им. К.А. Тимирязева;

Митюков Алексей Савельевич, доктор сельскохозяйственных наук, доцент, старший научный сотрудник, ФГБУН СПб ФИЦ РАН;

Монахос Сократ Григорьевич, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий кафедрой ботаники, селекции и семеноводства садовых растений ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА им. К.А. Тимирязева;

Новиков Михаил Алексеевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технических систем в агробизнесе ФГБОУ ВО СПбГАУ;

Осипова Галина Степановна, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, профессор кафедры плодовоовощеводства и декоративного садоводства ФГБОУ ВО СПбГАУ;

Павлюшин Владимир Алексеевич, академик Российской академии наук, доктор биологических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией микробиологической защиты растений ФГБНУ ВИЗР;

Парлюк Екатерина Петровна, доктор технических наук, доцент, заместитель заведующего кафедрой тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева;

Персикова Тамара Филипповна, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий кафедрой почвоведения УО «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия»;

Попов Владимир Дмитриевич, академик Российской академии наук, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник отдела агроэкологии в растениеводстве ИАЭП – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ;

Ракутько Сергей Анатольевич, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией энергоэффективных электротехнологий ИАЭП – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ;

Рогозина Елена Вячеславовна, доктор биологических наук, заведующий, научный сотрудник отдела генетических ресурсов картофеля ФГБНУ ВИР;

Ружьев Вячеслав Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, декан Инженерно-технологического факультета ФГБОУ ВО СПбГАУ;

Салеева Ирина Павловна, член-корреспондент Российской академии наук, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий лабораторией технологии производства мяса птицы ФНЦ «ВНИТИП» РАН;

Сафронов Сергей Леонидович, доктор сельскохозяйственных наук, доцент кафедры ветеринарной гигиены, кормления и разведения животных ФГБОУ ВО СПбГУВМ;

Смелик Виктор Александрович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технических систем в агробизнесе ФГБОУ ВО СПбГАУ;

Смыков Анатолий Владимирович, доктор сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник лаборатории южных плодовых и орехоплодных культур, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Ордена Трудового Красного Знамени Никитский ботанический сад – Национальный научный центр РАН»;

Сорокопудов Владимир Николаевич, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, профессор кафедры декоративного садоводства и газоноведения ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА им. К.А. Тимирязева;

Спиридонов Анатолий Михайлович, доктор сельскохозяйственных наук, доцент, заведующий кафедрой технологий хранения и переработки сельскохозяйственной продукции ФГБОУ ВО СПбГАУ;

Станишевская Ольга Игоревна, доктор биологических наук, руководитель отдела генетики, разведения и сохранения генетических ресурсов сельскохозяйственных птиц ВНИИГРЖ ФГБНУ «ФИЦЖ – ВИЖ имени академика Л.К. Эрнста»;

Терлецкий Валерий Павлович, доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории молекулярной генетики ВНИИГРЖ ФГБНУ «ФИЦЖ – ВИЖ имени академика Л.К. Эрнста»;

Чесноков Юрия Валентинович, доктор биологических наук, директор ФГБНУ АФИ;

Юдаев Игорь Викторович, доктор технических наук, профессор кафедры применения электроэнергии ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ;

Якушев Виктор Петрович, академик Российской академии наук, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий отделом моделирования адаптивных агротехнологий ФГБНУ АФИ.

**IZVESTIYA OF SAINT-PETERSBURG
STATE AGRARIAN UNIVERSITY**

Peer-reviewed scientific journal

4 issues per year

№ 3 (77)

Editor-in-Chief

Morozov Vitaliy Yurievich

Doctor of Veterinary Sciences, Professor, Rector

Deputy Editor-in-Chief

Kolesnikov Roman Olegovich

Candidate of Veterinary Sciences, Vice-Rector for Scientific,
Innovative and International Work

Executive Secretary

Mel'nikova Darya Andreevna

Candidate of Historical Sciences

EDITORIAL BOARD

Atroshchenko Gennady Parfyonovich, Doctor of Agricultural Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Fruit and Vegetable Growing and Ornamental Gardening, FSBEI HE SPbSAU;

Afanasenko Olga Sylvestrovna, Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Biological Sciences, Professor, Head of the Laboratory of Plant Immunity to Diseases, FSBSI VIZR;

Bezzubtseva Marina Mikhailovna, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Energy Supply of Enterprises and Electrical Technologies, FSBEI HE SPbSAU;

Bolgov Anatoly Efremovich, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Acting Head of the Department of Animal Science, Fish Farming, Agronomy and Land Management, FSBEI PetrSU;

Ganusevich Fedor Fedorovich, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Head of the Department of Crop Research named after. I. A. Stebut, FSBEI HE SPbSAU;

Gasparyan Irina Nikolaevna, Doctor of Agricultural Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Machine and Tractor Fleet Operation and High Technologies in Crop Production, FSBEI HE RSAU – MTAA;

Dolzhenko Victor Ivanovich, Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Head of the Center of Biological Regulation of Pesticides Use, FSBSI VIZR;

Dolzhenko Tatiana Vasilevna, Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Plant Protection and Quarantine, FSBEI HE SPbSAU;

Donskikh Nina Alexandrovna, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Head of the Department of Farming and Grassland Research, FSBEI HE SPbSAU;

Elena Edugartovna Epimakhova, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Professor of the basic department "Private Zootechnics, Breeding and Animal Breeding", FSBEI VO Stavropol State Agrarian University;

Ivanov Aleksey Ivanovich, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Chief Researcher, Head of the Department of Physical and Chemical Melioration and Experimental Studies, FSBSI ARI;

Kartashevich Anatoly Nikolaevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Tractors, Cars and Machines for Nature Management, EI «Belarusian State Agricultural Academy»;

Karynbaev Amanbai Kamarbekovich, Doctor of Agricultural Sciences, Chief Researcher, LLP «South-West Scientific Research Institute of Livestock and Plant Production»;

Kiru Stepan Dimitrovich, Doctor of Biological Sciences, Professor of the Department of Plant Growing named after. I. A. Stebut, FSBEI HE SPbSAU;

Lavrishchev Anton Viktorovich, Doctor of Agricultural Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Soil Science and Agrochemistry named after L.N. Alexandrova, FSBEI HE SPbSAU;

Laptev Georgy Yurievich, Doctor of Biological Sciences, Director of LLC «Biotrof»;

Levshin Alexander Grigorievich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department "Operation of Tractor Machines and High Technologies in Crop Production" RSGAU-MSKHA;

Mityukov Alexey Savelyevich, Doctor of Agricultural Sciences, Associate Professor, Senior Researcher, FGBUN SPb FIC RAS;

Monakhos Sokrat Grigorievich, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Head of the Department of Botany, Breeding and Seed Production of Garden Plants, FSBEI HE RSAU – MTAA;

Novikov Mikhail Alekseevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Technical Systems in Agribusiness, FSBEI HE SPbSAU;

Osipova Galina Stepanovna, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Professor of the Department of Fruit and Vegetable Cultivation and Ornamental Gardening, FSBEI HE SPbSAU;

Pavlyushin Vladimir Alekseevich, Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Biological Sciences, Chief Researcher, Head of the Laboratory of Microbiological Plant Protection, FSBSI VIZR;

Parlyuk Ekaterina Petrovna, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Deputy Head of the Department of Tractors and Automobiles, FSBEI HE RSAU – MTAA;

Persikova Tamara Fillipovna, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Head of the Department of Soil Science, EI «Belarusian State Agricultural Academy»;

Popov Vladimir Dmitrievich, Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher, of IEEP – branch of FSBSI FSAC VIM;

Rakutko Sergey Anatolyevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Laboratory of Energy Efficient Electrotechnologies, IEEP – branch of FSBSI FSAC VIM;

Rogozina Elena Vyacheslavovna, Doctor of Biological Sciences, Leading Researcher of the Department of Potato Genetic Resources, FSBSI VIR;

Ruzhyev Vyacheslav Anatolievich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Dean of the Faculty of Technical Systems, Service and Energy, FSBEI HE SPbSAU;

Saleeva Irina Pavlovna, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Head of the Laboratory of Poultry Meat Production Technology, FSC ARRTPI RAS;

Safronov Sergey Leonidovich, Doctor of Agricultural Sciences, Associate Professor, Department of Veterinary Hygiene, Feeding and Breeding of Animals, SPbGUVM

Smelik Viktor Alexandrovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Technical Systems in Agribusiness, FSBEI HE SPbSAU;

Smykov Anatoly Vladimirovich, Doctor of Agricultural Sciences, Senior Researcher, Chief Researcher of the Laboratory of Southern Fruit and Nut Crops, Federal State Budgetary Scientific Institution "Order of the Red Banner of Labor Nikitsky Botanical Garden – National Research Center RAS;

Sorokopudov Vladimir Nikolaevich, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Professor of the Department of Ornamental Horticulture and Lawn Science, FSBEI HE RSAU – MTAA named after K.A. Timiryazev;

Spiridonov Anatoly Mikhailovich, Doctor of Agricultural Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Storage Technology and Processing of Agricultural Products, FSBEI HE SPbSAU;

Stanishevskaya Olga Igorevna, Doctor of Biological Sciences, Head of the Department of Genetics, Breeding and Conservation of Genetic Resources of Agricultural Poultry, All-Russian Research Institute of Plant Breeding, FSBSI «L.K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry»;

Terletsky Valery Pavlovich, Doctor of Biological Sciences, Professor, Chief Researcher, Laboratory of Molecular Genetics, All-Russian Research Institute of Plant Breeding, FSBSI «L.K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry»;

Yudaev Igor Viktorovich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Electricity Use, FSBEI HE Kuban GAU;

Yakushev Victor Petrovich, Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Head of the Department of Modeling Adaptive Agricultural Technologies, FSBSI ARI.

СОДЕРЖАНИЕ

АГРОНОМИЯ

Арженовская Ю.Б., Кувшинова Е.К., Головко А.С. Продуктивность новых сортов гороха посевного на черноземе обыкновенном южной зоны Ростовской области.....	9
Ерегина С.В., Кузнецова М.М. Потенциал использования микроорганизмов рода <i>Bacillus</i> в растениеводстве.....	19
Кибальник О.П., Бычкова В.В., Ерохина А.В. Использование корреляционного анализа в селекции зернового сорго для засушливых регионов.....	36
Колесников Л.Е., Хассан Б.А.Х., Белимов А.А. Влияние ассоциативных ризобактерий на формирование продуктивности мягкой пшеницы в условиях Ленинградской области.....	45
Рогозина Е.В., Киру С.Д., Горшков О.А., Попов А.А., Соловьева А.Е. Влияние биопрепарата Ризобакт на продуктивность и качество сортов картофеля, перспективных для диетического питания.....	60

ЗООТЕХНИЯ, СЕЛЕКЦИЯ И ГЕНЕТИКА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЖИВОТНЫХ

Абдельманова А.С., Бардуков Н.В. Оценка полиморфизмов локуса <i>BOLA-DRB3.2</i> в образцах крупного рогатого скота разных веков.....	71
Васильева О.К. Изменение абсолютных показателей и оценки методом BLUP признаков молочной продуктивности коров черно-пестрой породы.....	79
Дорофеева А.В., Головина Т.Н., Самандеева Е.Г. Особенности генетической структуры лошадей тракененской породы по микросателлитным локусам.....	89
Соловьева А.Д., Денискова Т.Е. Полиморфизм гена инсулиноподобного фактора роста (<i>IGF-1</i>) у овец южной мясной породы.....	98
Форнара М.С., Бакоев Н.Ф. Разработка системы анализа D-петли митохондриальной ДНК крупного рогатого скота для образцов с деградированной ДНК.....	106

АГРОИНЖЕНЕРИЯ И ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЕ АПК

Габдрафиков Ф.З., Харисов Д.Д. Усовершенствование насос-форсунки Neui с кольцевым управляющим клапаном.....	117
Гришин А.Д., Беззубцева М.М. Сравнение схмотехнических решений блоков питания для агропромышленного комплекса.....	128
Даус Ю.В., Юдаев И.В. Оценка ресурса солнечной энергии территории объекта АПК.....	137
Ракутько Е.Н. Эффективность светокультуры томата с гибридным облучением.....	146

СТРАНИЦЫ АГРАРНОЙ ИСТОРИИ

Осипов А.И., Комаров А.А., Суханов П.А. Исторические вехи агрохимической службы в России.....	156
--	-----

CONTENTS

AGRONOMY

Arzhenovskaya Yu. B., Kuvshinova E.K., Golovko A.S. Productivity of new varieties of pea on ordinary chernozem in the southern zone of Rostov Region.....	9
Eregina S.V., Kuznetsova M.M. Potential for using of microorganisms <i>Bacillus</i> genus in crop production.....	19
Kibalnik O.P., Bychkova V.V., Erohina A.V. Use of correlation analysis in grain sorghum selection for arid regions.....	36
Kolesnikov L.E., Hassan B.A.H., Belimov A.A. Influence of associative rhizobacteria on forming of soft wheat productivity under conditions of Leningrad Region.....	45
Rogozina E.V., Kiru S.D., Gorshkov O.A., Popov A.A., Solovyeva A.E. Influence of Rhizobact biopreparation on productivity and quality of potato varieties promising for dietary nutrition.....	60

ANIMAL SCIENCE, GENETICS AND BREEDING OF FARM ANIMALS

Abdelmanova A.S., Bardukov N.V. Assessment of BoLA-DRB3.2 locus polymorphisms in cattle samples of different centuries.....	71
Vasileva O.K. Changes in absolute indicators and assessment by the BLUP method of milk productivity traits of black and white cows.....	79
Dorofeeva A.V., Golovina T.N., Samanteeva E.G. Features of the genetic structure of Trakehner horses by microsatellite loci.....	89
Solovyova A.D., Deniskova T.E. Insulin-like growth factor (IGF-1) gene polymorphism in sheep of southern meat breed.....	98
Fornara M.S., Bakoev N.F. Development of a bovine mitochondrial D-loop analysis system for samples with degraded DNA.....	106

AGROENGINEERING AND ENERGY SUPPLY OF THE AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX

Gabdrafikov F.Z., Kharisov D.D. Heui pump-injector unit improvement with ring control valve.....	117
Grishin A.D., Bezzubtseva M.M. Comparison of circuit design solutions of power supplies for the agro-industrial complex.....	128
Daus Yu.V., Yudaev I.V. Solar energy resource assessment of the agricultural industrial complex enterprise territory.....	137
Rakutko E.N. The effectiveness of a tomato plant lighting with hybrid irradiation.....	146

PAGES OF AGRICULTURAL HISTORY

Osipov A.I., Komarov A.A., Sukhanov P.A. Historical milestones of the agrochemical service in Russia.....	156
--	-----

Научная статья / Original paper

УДК 633.358:631.526.32(471.61–13)

Код ВАК 4.1.2

DOI: 10.24411/2078-1318-2024-3-9-18

ПРОДУКТИВНОСТЬ НОВЫХ СОРТОВ ГОРОХА ПОСЕВНОГО НА ЧЕРНОЗЕМЕ ОБЫКНОВЕННОМ ЮЖНОЙ ЗОНЫ РОСТОВСКОЙ ОБЛАСТИ


Ю.Б. Арженовская¹ , Е.К. Кувшинова¹ ✉, А.С. Головкин¹ 

¹Азово-Черноморский инженерный институт – филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования
«Донской государственной аграрный университет»
г. Зерноград, Ростовская область, Россия
✉ kuv.ek61@yandex.ru

Реферат. Статья посвящена оценке элементов структуры и урожайности новых сортов гороха посевного селекции Федерального Ростовского аграрного научного центра. Исследования проводили в 2022–2023 гг. в Азово-Черноморском инженерном институте (Россия, г. Зерноград). Почва опытного участка – чернозем обыкновенный. Метеорологические условия в годы исследований были контрастными. Гидротермический коэффициент за период вегетации гороха в 2022 году составил 0,65, что характеризовало его как очень засушливый; в 2023 г. ГТК составил 1,31, что соответствовало зоне обеспеченного увлажнения. Благоприятные условия вегетационного периода 2023 года способствовали более продолжительному цветению гороха, что отразилось на закладке генеративных органов, формировании бобов и урожайности семян. По количеству бобов на растении в 2022 году выделился сорт Амулет (3,6 шт.), в 2023 году – сорт Премьер (8,7 шт.). Наибольшее число семян на растении в оба года исследований сформировал сорт гороха Донец – 11,3 и 23,8 шт. соответственно. Самые крупные семена сформировал сорт Амулет, масса 1000 семян у которого в среднем составила 274,7 г. В 2022 году урожайность гороха варьировала от 1,91 у сорта Премьер до 2,23 т/га у сорта Донец при урожайности у стандарта 2,13 т/га; достоверность прибавок была не доказана. В условиях 2023 года урожайность у стандартного сорта Аксайский усатый 5 составила 3,15 т/га, у изучаемых сортов она варьировала от 2,94 т/га до 3,81 т/га. Максимальная урожайность сорта Амулет (3,81 т/га) достоверно превышала уровень стандартного сорта на 0,66 т/га. У остальных сортов урожайность семян гороха была ниже стандартного сорта Аксайский усатый 5 на 0,15–0,21 т/га. Таким образом, урожайность гороха в благоприятном 2023 году превышала урожайность предыдущего года на 34–87%.

Ключевые слова: осадки, температура, гидротермический коэффициент, горох посевной, сорт, элементы структуры, урожайность

Для цитирования: Арженовская, Ю.Б., Кувшинова, Е.К., Головкин, А.С. Продуктивность новых сортов гороха посевного на черноземе обыкновенном южной зоны Ростовской области // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2024. – № 3 (77). – С. 9–18. – DOI: 10.24411/2078-1318-2024-3-9-18.

**PRODUCTIVITY OF NEW VARIETIES OF PEA
ON ORDINARY CHERNOZEM IN THE SOUTHERN ZONE
OF ROSTOV REGION****Yu.B. Arzhenovskaya¹ , E.K. Kuvshinova¹  , A.S. Golovko¹ **¹Azov-Black Sea Engineering Institute – branch of Don State Agrarian University
Zernograd, Rostov Region, Russia
 kuv.ek61@yandex.ru

Abstract. The article is devoted to the evaluation of structure elements and yield of new pea varieties selected by the Federal Rostov Agrarian Research Center. The research was carried out in 2022–2023 at the Azov–Black Sea Engineering Institute (Russia, Zernograd). The soil of the experimental plot is ordinary chernozem. Meteorological conditions during the years of research were contrasting. The hydrothermal index (HTI) for the pea growing season in 2022 was 0.65, which is considered to be very dry; in 2023, the HTI was 1.31, which corresponded to the zone of ensured moisture. Favourable conditions of the growing season 2023 contributed to longer flowering of peas, which affected the establishment of generative organs, bean formation and seed yield. In terms of the number of beans per plant in 2022, the variety Amulet variety stood out (3.6 pieces), in 2023 the variety Premier variety did (8.7 pieces). The largest number of seeds per plant in both years of research was formed by the pea variety Donets, being at 11.3 and 23.8 pieces respectively. The largest seeds were produced by the variety Amulet, the weight of 1000 seeds of which averaged 274.7 g. In 2022, pea yields varied from 1.91 for the variety Premier to 2.23 t/ha for the variety Donets, the standard yield was 2.13 t/ha, while the reliability of increase in yield being not proven. Under the conditions of 2023, the yield of the standard variety Aksaisky Usatyi 5 was 3.15 t/ha; for the studied varieties it varied from 2.94 t/ha to 3.81 t/ha. The maximum yield of the variety Amulet (3.81 t/ha) significantly exceeded the level of the standard variety by 0.66 t/ha. For the remaining varieties, the yield of pea seeds was lower than the standard variety Aksaysky Usatyi 5 by 0.15–0.21 t/ha. Thus, the pea yield in the favorable year of 2023 exceeded the previous year's yield by 34–87%.

Key words: precipitation, temperature, hydrothermal index, edible pea, variety, structural elements, yield

For citation: Arzhenovskaya, Yu. B., Kuvshinova, E.K. and Golovko, A.S. (2024) 'Productivity of new varieties of pea on ordinary chernozem in the southern zone of Rostov Region', *Izvestia of Saint-Petersburg State Agrarian University*, vol. 77, no. 3, pp. 9–18. (In Russ.) DOI: 10.24411/2078-1318-2024-3-9-18.

Введение. Зернобобовые культуры являются важной составной частью в зерновом комплексе Ростовской области. Они одновременно решают следующие задачи: во-первых, дают высокие урожаи и являются одним из важных источников увеличения производства зерна; во-вторых, имеют высокое содержание белка в зерне и в зеленой массе, что делает их востребованными как для продовольственных целей, так и для нужд животноводства; в-третьих, поддерживают и повышают плодородие почвы, являясь одними из лучших предшественников основных зерновых культур, так как способны накапливать азот в симбиозе с азотфиксирующими бактериями и обеспечивать высокую продуктивность зернового звена севооборота.

Из них наибольшее распространение на Дону получил горох посевной, занимающий 80% площади посева всех зернобобовых культур. В 2023 г. Ростовская область заняла 1 место в России по урожайности гороха (39,5 ц/га) и второе по его валовому сбору (526,7 тыс. т).

Существенное значение в повышении урожайности имеет использование новых высокопродуктивных сортов. Влияние на урожайность такого фактора, как сорт, оценивают до 70% [1]. Создание сортов, способных реализовать биологический потенциал и адекватно реагировать на изменения условий среды, – одна из основных задач современной селекции [2]. Учеными Baranger A., Aubert G., Arnau G., Lainé A.L., Deniot G., Potier J., Weinachter C., Lejeune–Hénaut I., Lallemand J., Burstin J выявлены основные тенденции западноевропейской селекции за последние годы: увеличение размеров семян, преобладание белоцветковых форм и признака безлисточковости [3]. По состоянию на 2024 год в Северо-Кавказском регионе допущено к использованию 67 сортов гороха посевного, из них более 20% занимают сорта ФГБНУ «Федеральный Ростовский аграрный научный центр»¹.

Цель исследований – оценка элементов структуры и урожайности новых сортов гороха посевного на черноземе обыкновенном южной зоны Ростовской области.

Для достижения указанной цели поставлены следующие **задачи**:

- 1) охарактеризовать метеорологические условия в годы исследований;
- 2) проанализировать элементы продуктивности сортов гороха;
- 3) оценить урожайность исследуемых сортов.

Материалом для исследований послужили новые сорта гороха селекции ФГБНУ «Федеральный Ростовский аграрный научный центр» (п. Рассвет, Ростовская область): Сотник, Премьер, Амулет, Донец и сорт Аксайский усатый 5, исследуемый в качестве стандартного сорта. Краткое описание этих сортов представлено в таблице 1.

Таблица 1. **Характеристика изучаемых сортов гороха посевного**
Table 1. **Characteristics of the studied pea varieties**

Сорт	Год включения в реестр	Группа спелости	Тип растения и направление использования
Аксайский усатый 5, st	1996	Среднеспелый	Неосыпающийся, безлисточковый
Сотник	2019	Среднеспелый	Безлисточковый
Премьер	2019	Среднеспелый	Безлисточковый, ценный по качеству
Амулет	2020	Среднеспелый	Неосыпающийся, безлисточковый, ценный по качеству
Донец	2022	Среднеспелый	Безлисточковый

Исследования проводили в 2022–2023 гг. на опытном поле Агротехнологического центра Азово-Черноморского инженерного института ФГБОУ ВО Донской ГАУ (г. Зерноград, Ростовская область).

Почва опытного участка – чернозем обыкновенный карбонатный мощный теплый кратковременно промерзающий тяжелосуглинистый. Содержание органического вещества в пахотном слое почвы составляет 4,14% (ГОСТ 26213–2021), фосфора подвижного – 35,2 мг/кг, калия обменного – 330 мг/кг почвы (ГОСТ 26205–91).

Методика исследований. Для посева сортов гороха использовали сеялку СН–16. Сроки посева: 06 апреля 2022 г. и 21 марта 2023 г. Норма высева – 1,2 млн всхожих семян на гектар. Площадь делянки 41,25 м², учетная площадь делянки 40,00 м², повторность в опыте –

¹ Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию. Т. 1. «Сорта растений». – Москва: ФГБНУ «Росинформагротех», 2024. – 519 с.

трехкратная, размещение вариантов – систематическое, способ – последовательный². Предшественник – озимая пшеница. Все технологические операции осуществляли согласно Зональным системам земледелия Ростовской области для южной зоны³. Отбор снопов для анализа элементов продуктивности проводили в день уборки с площадок по 0,25 м² в трех повторениях. Опытные делянки убирали в первой половине июля прямым комбайнированием, используя малогабаритный комбайн «Terrio 2010». Учет урожая проводили путем взвешивания зерна со всей делянки. Подсчёт бобов и семян, массу семян определяли в Учебно-научно-производственной агротехнологической лаборатории института согласно методике госсортоиспытания сельскохозяйственных культур (1989)⁴. Массу 1000 семян устанавливали согласно ГОСТ 10842-89.

Условия проведения исследований. Известно, что температурный режим за вегетационный период и характер влагообеспеченности в значительной степени влияют на продуктивность сельскохозяйственных культур.

Метеоусловия в годы исследований были контрастными, особенно по количеству атмосферных осадков. В апреле и июне 2022 г. температура воздуха была выше среднееголетних значений на 2,0 °С и на 2,6 °С соответственно, а в мае на 1,7 °С было прохладнее. Среднесуточная температура воздуха за вегетационный период гороха в 2022 г. (с апреля по июнь включительно) составила 16,9 °С и была на 1,0 °С выше среднееголетних значений (15,9 °С), а в 2023 г. практически на одном уровне с ними и составила 15,8 °С. Немного прохладнее по сравнению со среднееголетними значениями (16,5 °С) был май 2023 г., когда среднесуточная температура воздуха составила 15,7 °С.

В оба года неравномерно распределялись и осадки, как в течение года, так и за вегетацию гороха. Острый их недостаток ощущался в мае и июне 2022 г. В мае, когда растения находились в фазе бутонизации, осадков выпало в 2,7 раза меньше среднееголетних значений. В июне ситуация ухудшилась и осадков было почти в 10 раз меньше. Данное обстоятельство повлекло слабое развитие растений в период цветения, образования и завязывания бобов, формирование меньшего их количества. Всего за период вегетации гороха в 2022 г. выпало 91,4 мм, что к среднееголетней норме составило всего 55%. Дефицит атмосферных осадков отрицательно повлиял на созревание и урожайность гороха. Гидротермический коэффициент за период вегетации гороха в 2022 г. составил 0,65, что характеризовало его как очень засушливый [4].

За такой же период 2023 г. выпало 233 мм, или 141% к среднееголетней норме (165,3 мм). К тому же осадки февраля 2023 г. (96 мм при среднееголетних значениях 37,3 мм), осадки апреля (82 мм или 192% к среднееголетней норме) и мая (114 мм или 222% к норме) оказали благоприятное влияние на запасы почвенной влаги, что положительно повлияло на получение дружных всходов, рост и развитие растений гороха. ГТК этого периода составил 1,31, что соответствует зоне обеспеченного увлажнения.

При таких благоприятных условиях вегетационного периода 2023 г. у гороха отмечалось более продолжительное цветение, что и сказалось на закладке генеративных органов и формировании бобов. Количество осадков за вегетацию гороха в годы исследований

² Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). – 6-е изд., стереотип. / Б. А. Доспехов. – Москва: ИД Альянс, 2011. – 352 с.

³ Зональные системы земледелия Ростовской области на 2013-2020 гг. Часть 1 / А. П. Авдеенко [и др.]; под ред. В. Н. Василенко. – Ростов-на-Дону, 2013. – 248 с.

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

приведено по данным метеостанции «Зерноград» (г. Зерноград, Ростовская область) (рисунок 1).

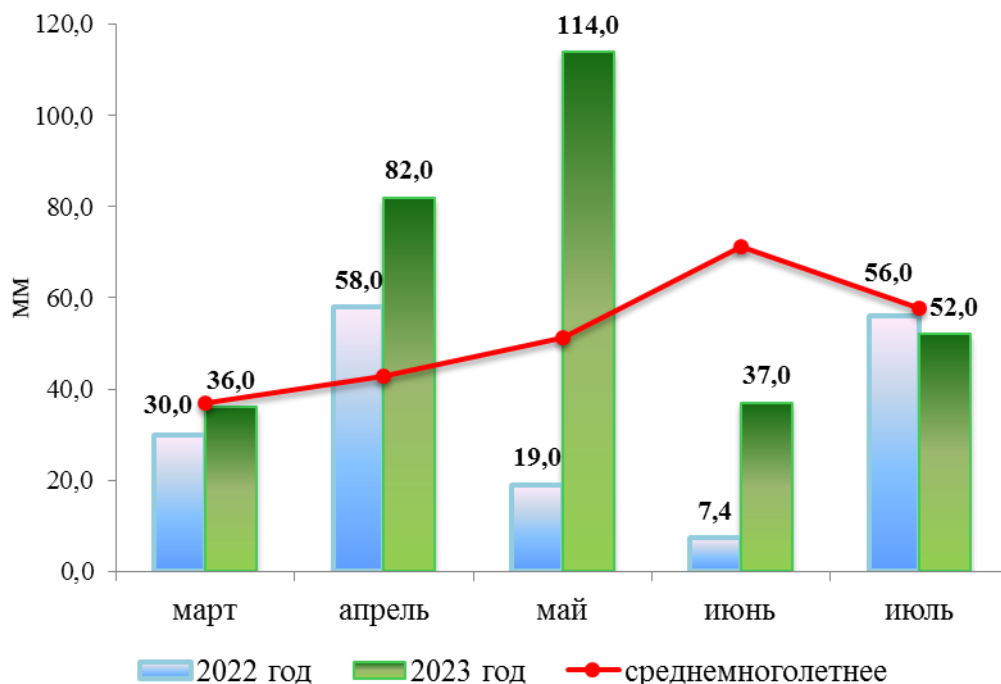


Рисунок 1. Количество осадков за вегетационный период гороха, мм (2022–2023 гг.)
Figure 1. Amount of precipitation during the pea growing season, mm (2022–2023)

Более благоприятным по количеству и периодам выпадения осадков, а также по урожайности гороха был 2023 г.

Результаты исследований. Продуктивность растения гороха зависит от следующих элементов структуры урожая: числа семян на растении и массы 1000 семян. Эти показатели являются главными сортовыми признаками культуры. Также необходимо учитывать, что число семян на растении является величиной производной, определяемой количеством бобов на растении и числом семян в бобе [5, 6].

При проведении структурного анализа растений гороха установлено, что величины различных признаков продуктивности у разных сортов были неодинаковыми.

В наших исследованиях признак «количество бобов на растении» зависел не только от генотипа сорта, но и от условий среды. Так, в 2022 году количество бобов на растении у изучаемых сортов было на уровне стандарта (2,6 шт.), варьировало от 2,6 шт. у сорта Премьер до 3,6 шт. у сорта Амулет (таблица 1, рисунки 2, 3).

Таблица 1. Число бобов на растении у сортов гороха, шт. (2022–2023 гг.)
Table 1. Number of beans per plant for pea varieties, pcs (2022–2023)

Сорт	2022 г.	± к стандарту	2023 г.	± к стандарту	Среднее за два года	± к стандарту
Аксайский усатый 5, st	2,6	–	6,4	–	4,5	–
Сотник	2,7	0,1	4,0	–2,4	3,4	–1,1
Премьер	2,6	0,0	8,7	2,3	5,7	1,2
Амулет	3,6	1,0	5,7	–0,7	4,7	0,2
Донец	3,2	0,6	4,5	–1,9	3,9	–0,6
НСР ₀₅	1,02		1,81		–	



Рисунок 2. Сорт Амулет в поле 22.06.2022
Figure 2. Variety Amulet in the field
dated 06.22.2022



Рисунок 3. Сорт Амулет, размер бобов
16.07.2022
Figure 3. Variety Amulet, bean size dated
07.16.2022

В 2023 г. количество бобов на растениях было сформировано больше, чем в предыдущем году. У стандартного сорта Аксайский усатый 5 их число составило 6,4 шт. Достоверно выше, чем у сорта-стандарта, количество сформировавшихся бобов было только у сорта Премьер – 8,7 шт., а у сортов Сотник и Донец этот признак был достоверно ниже стандарта на 2,4 и 1,9 шт., и соответственно сортам составил 4,0 и 4,5 шт. В среднем за 2 года исследований самое высокое количество бобов сформировали сорта Премьер (5,7 шт.) и Амулет (4,7 шт.), превысив стандартный сорт на 1,2 и 0,2 шт. соответственно.

Количество семян с растения – один из наиболее важных признаков в структуре урожая, имеющий большое значение при формировании урожайности. Этот признак зависит не только от сортовых особенностей культуры, но и от внешних факторов окружающей среды. В столь контрастные по увлажнению годы число семян на растениях изучаемых сортов в засушливом для культуры гороха 2022 г. было намного ниже, чем в 2023 г.

В 2022 г. этот признак у изучаемых сортов варьировал от 6,7 шт. у сорта Премьер до 11,3 шт. у сорта Донец (при 10,2 шт. у стандартного сорта Аксайский усатый 5). В благоприятных условиях 2023 года число семян на растении увеличилось более чем в 2 раза. Сорт Аксайский усатый 5 сформировал 22,9 шт., а самым результативным был также сорт Донец, сформировавший 23,8 семян, превысив на 0,9 шт. стандартный сорт. Меньше всего семян образовалось у сорта Амулет – 17,4 шт. Однако несмотря на то, что сорт Донец в оба года лидировал по признаку «число семян на растении», достоверность его превышения над стандартным сортом Аксайский усатый 5 не доказана. У остальных сортов гороха этот признак имел значения ниже сорта-стандарта, но они в оба года были незначительны (таблица 2).

Таблица 2. Число семян на растении у сортов гороха, шт. (2022–2023 гг.)
Table 2. Number of seeds per plant for pea varieties, pcs (2022–2023)

Сорт	2022 г.	± к стандарту	2023 г.	± к стандарту	Среднее за два года	± к стандарту
Аксайский усатый 5, st	10,2	–	22,9	–	16,6	–
Сотник	7,8	–2,4	18,5	–4,4	13,2	–3,4
Премьер	6,7	–3,5	19,1	–3,8	12,9	–3,7
Амулет	9,4	–0,8	17,4	–5,5	13,4	–3,2
Донец	11,3	1,1	23,8	0,9	17,6	1,0
НСР ₀₅	3,96		6,15		–	

В среднем за 2 года величина этого признака варьировала от 12,9 шт. до 17,6 шт. У стандартного сорта на каждом растении сформировалось по 16,6 шт. семян. Только сорт Донец по данному признаку превысил стандартный сорт, образовав 17,6 шт. семян на каждом растении. Все остальные сорта сформировали число семян на растении ниже стандарта на 3,2–3,7 шт.

Семенная продуктивность растений гороха – один из сложнейших признаков; она обусловлена взаимодействием многих генов и влиянием почвенно-климатических и агротехнических условий. В условиях опыта масса семян с одного растения в 2022 г. варьировала от 1,5 г до 2,5 г. У сортов Амулет и Донец масса семян с растений была выше стандарта на 0,5–0,7 г. В 2023 г. данный признак варьировал от 3,7 г до 4,8 г. Превышением над сортом Аксайский усатый 5 (на 0,2 г) отличился сорт Премьер. В годы проведения опытов достоверность увеличения или снижения массы семян с растения не доказана. В среднем за два года только у сорта Амулет масса семян с растения была выше стандартного сорта Аксайский усатый 5 – на 0,3 г. У остальных сортов она была на уровне или несколько ниже, чем у стандарта (таблица 3).

Таблица 3. Масса семян с растения у сортов гороха, г (2022–2023 гг.)
Table 3. Seed weight per plant for pea varieties, g (2022–2023)

Сорт	2022 г.	± к стандарту	2023 г.	± к стандарту	Среднее за два года	± к стандарту
Аксайский усатый 5, st	1,8	–	4,6	–	3,2	–
Сотник	1,7	–0,1	3,7	–0,9	2,7	–0,5
Премьер	1,5	–0,3	4,8	0,2	3,2	0,0
Амулет	2,5	0,7	4,5	–0,1	3,5	0,3
Донец	2,3	0,5	3,9	–0,7	3,1	–0,1
НСР ₀₅	0,88		1,45		–	

Важным элементом продуктивности растений является масса 1000 семян, характеризующая их крупность. В 2022 г. у всех сортов данный признак был достоверно выше, чем у стандартного сорта Аксайский усатый 5 (198,9 г.). Самую высокую массу 1000 зерен сформировал сорт Амулет – 275,2 г (таблица 4).

Таблица 4. Масса 1000 семян у сортов гороха, г (2022–2023 гг.)
Table 4. Weight of 1000 seeds for pea varieties, g (2022–2023)

Сорт	2022 г.	± к стандарту	2023 г.	± к стандарту	Среднее за два года	± к стандарту
Аксайский усатый 5, st	198,9	–	204,9	–	201,9	–
Сотник	246,1	47,2	225,1	20,2	235,6	33,7
Премьер	248,5	49,6	255,3	50,4	251,9	50,0
Амулет	275,2	76,3	274,1	69,2	274,7	72,8
Донец	240,3	41,4	216,7	11,8	228,5	26,6
НСР ₀₅	15,1		17,4		–	

В 2023 г. масса 1000 семян варьировала от 204,9 г у сорта Аксайский усатый 5 до 274,1 г у сорта Амулет. В оба года исследований все изучаемые сорта отличались более высокой крупностью семян по сравнению со стандартом и достоверно его превышали. В среднем за 2 года превышение новых сортов гороха над стандартом по признаку «масса 1000 семян» составило 26,6–72,8 г. Стабильно самые крупные семена формировал сорт Амулет, масса 1000 семян у этого сорта в среднем составила 274,7 г. Учитывая тот факт, что годы исследований различались по количеству осадков, на массу 1000 семян у изучаемых сортов сложившиеся метеоусловия влияния не оказали.

Основным хозяйственно ценным признаком является урожайность, которая зависит от количества плодоносящих растений на единицу площади и массы семян на одном растении. В 2022 году урожайность гороха варьировала от 1,91 т/га у сорта Премьер до 2,23 т/га у сорта Донец. При урожайности сорта-стандарта 2,13 т/га достоверность прибавки даже самого урожайного сорта Донец (2,23 т/га) не доказана. В условиях 2023 г. урожайность у стандартного сорта Аксайский усатый 5 составила 3,15 т/га, у изучаемых сортов она варьировала от 2,94 т/га до 3,81 т/га. Максимальная урожайность сорта Амулет (3,81 т/га) достоверно превышала уровень стандартного сорта на 0,66 т/га. У остальных сортов урожайность семян гороха была ниже стандартного сорта Аксайский усатый 5 на 0,15–0,21 т/га, но такое снижение было несущественным (таблица 5).

Таблица 5. Урожайность сортов гороха, т/га (2022–2023 гг.)
Table 5. Productivity of pea varieties, t/ha (2022–2023)

Сорт	2022 г.	± к стандарту	2023 г.	± к стандарту	Среднее за два года	± к стандарту
Аксайский усатый 5, st	2,13	–	3,15	–	2,64	–
Сотник	1,96	–0,17	2,94	–0,21	2,45	–0,19
Премьер	1,91	–0,22	2,99	–0,16	2,45	–0,19
Амулет	2,03	–0,10	3,81	0,66	2,92	0,28
Донец	2,23	0,10	3,00	–0,15	2,62	–0,02
НСР ₀₅	0,26		0,64		–	

В среднем за 2 года урожайность изменялась от 2,45 до 2,92 т/га при урожайности стандартного сорта 2,64 т/га. Максимальная урожайность получена у сорта Амулет 2,92 т/га.

Выводы. Благоприятные по влагообеспеченности условия 2023 г. позволили изучаемым сортам сформировать более высокую урожайность семян по сравнению с предыдущим годом на 34–87%.

В среднем за 2 года наибольшее число бобов на растении формировал сорт Премьер – 5,7 шт. По количеству семян на одном растении выделился сорт Донец – 17,6 шт. Наибольшую массу семян на растении – 3,5 г, массу 1000 семян – 274,7 г и урожайность 2,92 т/га обеспечил сорт Амулет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алабушев, А.В. Сорт как фактор инновационного развития зернового производства / А. В. Алабушев // Зерновое хозяйство России. – № 3 (15). – 2011. – С. 8–11.
2. Mohammadi R., Golkari S. Genetic resources for enhancing drought tolerance from a mini-core collection of spring bread wheat (*Triticum aestivum* L.) // *Acta Scientiarum. Agronomi.* – 2022. – Vol. 4. – Pp. 2–16. – DOI: 10.4025/actasciagron.v44i1.56129.
3. Baranger, A. et al. Genetic diversity within *Pisum sativum* using protein- and PCR-based markers. *Theor. Appl. Genet.* 2004; 108: 1309–1321. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00122-003-1540-5>.
4. Эколого-географические последствия глобального потепления климата XXI века на Восточно-Европейской равнине и в Западной Сибири. / Под ред. Н. С. Касимова и А.В. Кислова. – М.: МАКС Пресс, 2011. – 496 с.
5. Лысенко, А.А. Оценка коллекционных образцов гороха по элементам продуктивности / А. А. Лысенко, Н. А. Коробова // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2019. – № 7–1. – С. 107–112.
6. Ашиев, А.Р., Скулова, М.В., Хабибуллин, К.Н. Урожайность и элементы ее структуры новых линий гороха // Зерновое хозяйство России. – 2018. – № 5 (59). – С. 26–28. DOI: <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2018-59-5-26-28>.

REFERENCES

1. Alabushev, V.A. “Variety as a factor in the innovative development of grain production”, *Grain Economy of Russia*, 2011, № 3, pp. 8–11. (In Russ)
2. Mohammadi, R. and Golkari, S. (2021). ‘Genetic resources for enhancing drought tolerance from a mini-core collection of spring bread wheat (*Triticum aestivum* L.)’, *Acta Scientiarum. Agronomy*, 44, p. e56129, DOI: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v44i1.56129>.
3. Baranger, A. et al. (2004). ‘Genetic diversity within *Pisum sativum* using protein- and PCR-based markers’, *Theoretical and Applied Genetics*, [online] 108(7), pp. 1309–1321, DOI: <https://doi.org/10.1007/s00122-003-1540-5>.
4. Kasimov, N.S, Kislova, A.V. (2011) ' Ecological and geographical consequences of global warming in the 21st century on the East European Plain and Western Siberia' Ed.: MAKS Press, 496 p.
5. Lysenko, A.A., Korobova N.A. (2019) ‘Evaluation of collection samples pea productivity elements’, *International Journal of Humanities and Natural Sciences*, no. 7–1, pp. 107–112.
6. Ashiev, A.R., Skulova, M.V. and Khabibullin, K.N. (2018). ‘Productivity and elements of its structure of the new pea lines’, *Grain Economy of Russia*, (5), pp. 26–28, DOI: <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2018-59-5-26-28>.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Юлия Борисовна Арженовская, аспирант кафедры агрономии и селекции сельскохозяйственных культур, Азово-Черноморский инженерный институт – филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Донской государственной аграрной университет», г. Зерноград, Ростовская область, Россия; <https://orcid.org/0000-0003-3855-372X>, SPIN-код: 8477-9020, AuthorID: 1014843; e-mail: missismart@mail.ru.

Елена Константиновна Кувшинова, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, доцент кафедры агрономии и селекции сельскохозяйственных культур, Азово-Черноморский инженерный институт – филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Донской государственной аграрной университет» в г. Зернограде, г. Зерноград, Ростовская область, Россия; <http://orcid.org/0000-0002-3769-4718>, SPIN-код: 3408-4060, AuthorID: 358294; e-mail: kuv.ek61@yandex.ru.

Анатолий Сергеевич Головко, аспирант кафедры агрономии и селекции сельскохозяйственных культур, Азово-Черноморский инженерный институт – филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Донской государственной аграрной университет» в г. Зернограде, Ростовская область, Россия; <http://orcid.org/0000-0002-5865-9102>, SPIN-код: 3409-7461, AuthorID: 1186540; e-mail: anatoliya509@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yulia B. Arzhenovskaya, Postgraduate Student, the Department of Agronomy and Crop Breeding, Azov-Black Sea Engineering Institute – branch of Don State Agrarian University in Zernograd, Zernograd, Rostov Region, Russia; <https://orcid.org/0000-0003-3855-372X>, SPIN-code: 8477-9020, AuthorID: 1014843; e-mail: missismart@mail.ru.

Elena K. Kuvshinova, Cand. Sci. (Agric.), Associate Professor, the Department of Agronomy and Crop Breeding, Azov-Black Sea Engineering Institute – branch of Don State Agrarian University in Zernograd, Zernograd, Rostov Region, Russia; <http://orcid.org/0000-0002-3769-4718>, SPIN-code: 3408-4060, AuthorID: 358294; e-mail: kuv.ek61@yandex.ru.

Anatoly S. Golovko, Postgraduate Student, the Department of Agronomy and Crop Breeding, Azov-Black Sea Engineering Institute – branch of Don State Agrarian University in Zernograd, Rostov Region, Russia; <http://orcid.org/0000-0002-5865-9102>, SPIN-code: 3409-7461, AuthorID: 1186540; e-mail: anatoliya509@mail.ru.

Авторский вклад. Все авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении и анализе данного исследования. Все авторы настоящей статьи ознакомились и одобрили представленный окончательный вариант.

Author's contribution. All authors of this research paper have directly participated in the planning, execution, or analysis of this study. All authors of this paper have read and approved the final version submitted.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Received 03.06.2024
Поступила после рецензирования / Revised 30.07.2024
Принята к публикации / Accepted 20.08.2024

Обзорная статья / Review article


УДК 579.6

Код ВАК: 4.1.3

DOI: 10.24411/2078-1318-2024-3-19-35

**ПОТЕНЦИАЛ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МИКРООРГАНИЗМОВ
РОДА *BACILLUS* В РАСТЕНИЕВОДСТВЕ**С.В. Ерегина¹ , М.М. Кузнецова¹  ¹Вологодский научный центр Российской академии наук

г. Вологда, Россия

 137lidia@gmail.com

Реферат. Микроорганизмы являются неотъемлемой частью эффективного сельскохозяйственного производства. Они применяются в различных направлениях растениеводства в качестве средств защиты растений от различных патогенов (насекомых-вредителей, грибов, бактерий и вирусов). В обзоре систематизированы литературные данные о бактериях *Bacillus sp.*, их физиологических и производственных преимуществах, использовании в новых микробиологических препаратах, имеющих значительный потенциал в практике сельского хозяйства. Показано, что *Bacillus sp.* содержат большое количество природных штаммов, которые продуцируют множество разнообразных сочетаний вторичных метаболитов, обладающих различной активностью. В связи с этим не теряет актуальности поиск новых штаммов, которые бы обладали требуемыми свойствами. Так, штаммы *Bacillus subtilis* продуцируют ферменты (амилаза, протеиназа), рекомбинантные белки, антимикробные соединения (полимиксин, циркулин и колистин), адсорбенты, поверхностно-активные соединения, витамины, пуриновые нуклеозиды и другие продукты. *Bacillus thuringiensis* способствует стимуляции роста растений через продукцию индол-три-уксусной кислоты и обладает полифункциональными свойствами (в том числе инсектицидными) из-за содержания эндотоксина в белковом кристалле. Некоторые разновидности выделяют термостабильный бета-экзотоксин, который в комбинации со споро-кристаллическим комплексом усиливает энтомоцидный эффект и расширяет спектр действия. *Bacillus megaterium* синтезирует белки, используемые для производства синтетических пенициллинов, пирувата и фунгицидных токсинов. *Bacillus safensis* синтезирует биосурфактанты и каротиноиды – промышленно важные ферменты, которые применяются для стимуляции роста растений, а также используются в роли агентов биологического контроля против фитопатогенных грибов. Помимо того, что представители рода *Bacillus* используются в качестве основы биопрепаратов фитопатогенного (противовирусного, антибактериального или антифунгального) действия, они также эффективны для создания биоудобрений. Несомненной сильной стороной в сравнении с другими родами бактериальных микроорганизмов является способность *Bacillus* избегать конкуренции со стороны аборигенных видов бактерий, а также их быстрое размножение и широкая антагонистическая активность, поэтому в вопросах сельскохозяйственной биотехнологии их применяют все более активно.


Ключевые слова: *Bacillus sp.*, *Bacillus subtilis*, *Bacillus thuringiensis*, *Bacillus megaterium*, *Bacillus safensis*, микробиологические препараты, сельское хозяйство, экологизация, повышение урожайности

Для цитирования: Ерегина, С.В., Кузнецова, М.М. Потенциал использования микроорганизмов рода *Bacillus* в растениеводстве // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2024. – № 3 (77). – С. 19–35. – DOI: 10.24411/2078-1318-2024-3-19-35.

Финансирование: Исследование выполнено в рамках государственного задания лаборатории по теме НИР № FMGZ-2022-0010 «Совершенствование системы кормопроизводства и кормления животных в молочном скотоводстве на основе использования биотехнологий».

POTENTIAL FOR USING OF MICROORGANISMS *BACILLUS* GENUS IN CROP PRODUCTION

S.V. Eregina¹ , M.M. Kuznetsova¹  

¹Vologda Research Center of the Russian Academy of Sciences,
Vologda, Russia
 137lidia@gmail.com

Abstract. Microorganisms are an integral part of efficient agricultural production. They are used in various areas of both crop production as plant protection products from various pathogens (insect pests, fungi, bacteria and viruses). The review systematizes the literature data on *Bacillus sp.* bacteria, their physiological and production advantages, and their use in new microbiological preparations that have significant potential in agricultural practice. It has been shown that *Bacillus sp.* contains a wide variety of natural strains that produce many different combinations of secondary metabolites with different activities. In this regard, the search for new strains that would have the required properties remains relevant. Thus, *Bacillus subtilis* strains produce enzymes (amylase, proteinase), recombinant proteins, antimicrobial compounds (polymyxin circulin and colistin), insecticides, adsorbents, surfactants, vitamins, purine nucleosides and other products. *Bacillus thuringiensis* has insecticidal properties due to the endotoxin content in the protein crystal and helps stimulate plant growth through the production of indole-3-acetic acid. *Bacillus megaterium* synthesizes proteins used to produce synthetic penicillins, pyruvate and fungicidal toxins. *Bacillus safensis* strains are capable of producing industrially important enzymes, carotenoids, biosurfactants, and compounds used to stimulate plant growth and as biocontrol agents against phytopathogenic fungi. In addition to using representatives of the genus *Bacillus* as the basis for biological products with phytopathogenic (antiviral, antibacterial or antifungal) action, they are also effective for creating biofertilizers. An undoubted strength in comparison with other genera of bacterial microorganisms is the ability of *Bacillus* to avoid competition from native species of bacteria, as well as their rapid reproduction and broad antagonistic activity, therefore they are increasingly used in agricultural biotechnology.

Keywords: *Bacillus sp.*, *Bacillus subtilis*, *Bacillus thuringiensis*, *Bacillus megaterium*, *Bacillus safensis*, microbiological preparations, agriculture, greening, increasing productivity

For citation: Eregina, S.V. and Kuznetsova, M.M. (2024) 'Potential for using of microorganisms *Bacillus* genus in crop production', *Izvestia of Saint-Petersburg State Agrarian University*, vol. 77, no. 3, pp. 19–35. (In Russ.) DOI: 10.24411/2078-1318-2024-3-19-35.

Financial support: The study was carried out within the framework of the state assignment of the laboratory on the topic of research work No. FMGZ–2022–0010 “Improving the system of feed production and animal feeding in dairy cattle breeding based on the use of biotechnology”.

Введение. Биологические препараты активно применяются в сельском хозяйстве, так как стимулируют рост растений благодаря улучшению азотного и фосфорного питания, регуляции осмотического давления, модифицированию развития корневой системы, они защищают от вредителей и болезнетворных организмов (патогенных грибов, бактерий, вирусов), а также очищают почву от ксенобиотиков. Опыт ведущих стран с высокоразвитым сектором сельскохозяйственного производства показывает, что одним из эффективных способов решения задач является использование в растениеводстве препаратов на основе

микроорганизмов, положительно сказывающееся на минеральном питании растений [1]. В мировой сельскохозяйственной практике широко применяются микроорганизмы с фитозащитными свойствами в отношении бактериальных и/или грибных инфекций. Самым востребованным родом на данный момент для сельского хозяйства является род *Bacillus*, на основе которого имеются разнообразные биопрепараты, защищающие от 160 видов насекомых-вредителей [2]. В основе биопрепаратов лежат такие бациллы, как *B. amyloliquefaciens* FZB-24 (основа препаратов RhizoPlus, AbiТер GmbH, ФРГ и Taegro, Novozyme, Дания), *B. amyloliquefaciens* IN937a (основа препарата BioYield, Gustafson, США), *B. pumilus* QST 2808 (основа препарата Ballad+, AgraQuest Inc., США). В борьбе с японским хрущиком отлично показал себя вид *B. popilliae*, а с комарами – *B. sphaericus*.

В современных геополитических условиях с высоким уровнем санкционного давления на Россию встает острая необходимость в разработке отечественных биопрепаратов и популяризации их применения в сельском хозяйстве для увеличения урожайности культур, что обеспечит продовольственную безопасность страны. Зависимость российского АПК от целого ряда зарубежных товаров, включая семена, средства защиты растений, кормовые добавки, создала существенные трудности в функционировании некоторых секторов АПК [3]. Так как поставки иностранных препаратов в Россию ограничены, акцент в статье сделан на отечественные разработки.

Кроме того, учитывая современную тенденцию общества к экологизации АПК и популярность экологически чистых продуктов питания, внедрение в практику растениеводства микробиологических биопрепаратов позволит уменьшить количество вносимых в почву удобрений. Таким образом, преимущества, имеющиеся у микробиологических препаратов, приводят к увеличению интереса к ним у производителей продукции сельского хозяйства [4].

Цель исследования – показать возможности совершенствования технологий растениеводства на основе применения российских микробиологических сельскохозяйственных препаратов.

Материалы, методы и объекты исследований. Данная работа является обзорной; ее теоретическая база – труды отечественных и зарубежных исследований в области применения биотехнологий с целью совершенствования сельскохозяйственного производства.

Результаты исследований. Становление прикладной микробиологии обусловлено заинтересованностью социума в применении микроорганизмов для увеличения урожайности используемых культур. Уже к концу XIX в. было известно об эффективном симбиозе бобовых сельскохозяйственных культур и клубеньковых микроорганизмов. Это послужило толчком к поиску похожих бактерий для применения их с другими семействами растений. В России на рубеже XIX–XX вв. на практике были проведены первые попытки бактеризации семян не бобовых растений с такими родами, как *Bacillus* и *Azotobacter* [5]. После положительных результатов уже с 1930-х гг. Всесоюзный НИИ сельскохозяйственной микробиологии дал рекомендации к применению для широкого использования препаратов на основе *B. megaterium* и *A. chroococcum* [6]. Инсектицидные свойства кристаллов *B. thuringiensis* были выявлены при обнаружении мертвых гусениц мучной моли, содержавших споры и кристаллы. Прямое воздействие спор или кристаллов на здоровых гусениц не принесло никакого результата, гусеницы прекращали питаться и погибали, когда попадали на листья. Определенный потенциал в качестве инсектицида был признан у *B. thuringiensis* Маттесом в

1927 году, когда он выделил штамм, открытый Эрнстом, и последующие полевые исследования против европейского кукурузного мотылька (*Ostrinia nubilalis*) показали перспективные результаты [7]. Эта работа в конечном итоге привела к разработке спорина – коммерческого инсектицида *B. thuringiensis*, который был впервые использован в 1938 г.

Результаты проведенных в СССР многочисленных полевых экспериментов показали, что в среднем урожайность зерновых культур увеличивалась на 10%, а овощных – на 15–50%. По данным Соопер R., в 1960-х гг. площадь эксплуатации микробиологических препаратов в СССР достигала 35 млн га [8].

Увеличение объемов использования микроорганизмов и продуктов их жизнедеятельности в сельском хозяйстве стало одним из важнейших направлений инновационного развития биотехнологий в XXI в. [9]. Первостепенной целью сельскохозяйственной микробиологии в настоящее время является повышение плодородия почвы и урожайности возделываемых культур [10]. Почвенные микроорганизмы, являясь редуцентами, разлагают труднодоступные вещества, превращая их в более удобные для усвоения растениями элементы. В связи с этим поиск и выделение культур микрофлоры, а также создание биопрепаратов на их основе способствуют повышению продуктивности пашен, в том числе площадей с кормовыми культурами. Несомненным преимуществом является их способность к продуцированию ауксинов, витаминов и сидерофоров. Но целесообразность применения таких препаратов колеблется в широком диапазоне из-за недостаточной изученности поведения внедряемых в почвенный слой бацилл [11].

Способность микроорганизмов проявлять антагонизм и тем самым подавлять непосредственное развитие патогенных грибов нашла применение в препаратах для защиты от болезней зерновых и кормовых культур, так называемых биофунгицидах, наряду с химическими фунгицидами [12]. С помощью микробиологических препаратов, которые, в отличие от химических средств защиты растений, безопасны для человека и окружающей среды, проще контролировать развитие бактериальных и грибковых инфекций в процессе вегетации и при хранении полученной продукции. Несмотря на интенсивные исследования, количество изученных микроорганизмов невелико, а число микробиологических препаратов, в настоящее время разрешенных в России к применению, ограничено [13], что заставляет исследователей продолжать поиск более эффективных штаммов.

Одним из перспективных родов, который используется в качестве основы для обширного количества биопрепаратов, являются бактерии рода *Bacillus* [14]. *Bacillus sp.* – род многочисленный, он включает более 200 видов грамположительных аэробных спорообразующих палочковидных бактерий, устойчивых к враждебным физическим и химическим факторам. По образу жизни имеются свободноживущие, симбиотические, а также небольшая часть патогенных (*B. anthracis*). Чаще всего бациллы являются почвенными микроорганизмами, разрушающими останки живых организмов, превращая их в простые соединения. Многие виды этих бактерий имеют физиологические способности, позволяющие им обитать в широком диапазоне естественных условий. Способность к образованию спор повышает их устойчивость к негативным воздействиям, таким как высушивание и экстремальные температуры, воздействие обеззараживающими химическими препаратами и ионизирующими излучениями. Вышеперечисленные свойства описываемых бактерий способствовали их широкому распространению и заселению всех сред обитания – воды, почвы, воздуха, пищевых продуктов, объектов внешней среды, а также растительных и

животных организмов. Кроме того, широкой распространенности бактерий рода *Bacillus* способствует их разнообразная биологическая активность – свойства, благодаря которым бациллы играют значительную роль в круговоротах веществ в природе [15].

Первым достоинством бацилл в промышленном производстве является их устойчивость к неблагоприятным факторам окружающей среды, которая позволяет организовать долговременное хранение штаммов промышленного назначения в виде высушенных спор (так бактерии сохраняют свою активность). Вторым их достоинством является простота культивирования (в отличие от бифидо- и лактобактерий, большинство видов *Bacillus* не так требовательны к окружающей среде). Третье достоинство – высокая технологичность и способность выделять интактные белки в субстрате. Кроме того, они практичны при использовании в полевых условиях, так как могут быть внесены в обрабатываемые культуры традиционными методами.

Несомненной сильной стороной в сравнении с другими родами бактериальных микроорганизмов является способность *Bacillus* избегать конкуренции со стороны аборигенных видов бактерий, а также их быстрое размножение и широкая антагонистическая активность [16]. Различные представители бацилл толерантны к наличию или отсутствию кислорода, способны развиваться в большом диапазоне температур и при различной рН среды, а также использовать в качестве источников питания разнообразные органические и неорганические соединения [17]. В связи с этим в вопросах сельскохозяйственной биотехнологии их применяют все более активно. Рассмотрим особенности наиболее широко используемых в растениеводческой практике штаммов *Bacillus*.

Самым распространенным видом из рода *Bacillus* является *B. subtilis*, встречающийся повсеместно в почве и воздушной пыли. Это палочковидная подвижная бактерия размером 2–5×0,4–0,6 мкм с перитрихальным расположением жгутиков и овальными спорами. Колонии *B. subtilis* сухие, мелкоморщинистые, бархатистые, бесцветные или розовые, край колонии волнистый. *B. subtilis* – хемоорганогетеротроф, аммонифицирующий белки и расщепляющий крахмал, гликоген, оптимальная температура для развития составляет от +5 до +45 °С. В связи с тем, что 5% генома данной бактерии отвечает за синтез антибактериальных соединений, *B. subtilis* является одним из самых продуктивных видов [18].

Препарат фитоспорин – первый российский биофунгицид, созданный на основе живых спор и клеток эндофитного штамма 26Д бактерии *B. subtilis*, разрешенный для использования в России. Существуют работы, доказывающие, что обработка семян сельскохозяйственных культур этим препаратом способствует лучшему росту растений и снижает их поражение различными болезнями, тем самым приводит к повышению продуктивности возделываемых культур [19].

Бактерий рода *Bacillus* способны оказывать пробиотическое действие, что привело к созданию на их основе препаратов – «самоэлюминирующихся антагонистов». В результате к настоящему времени в мире создано более 50 препаратов, полностью или частично составленных на основе бактерий *B. subtilis* [20].

На основе *Bacillus subtilis* ВНИИ сельскохозяйственной микробиологии ООО «Бисолби-Интер» были разработаны новейшие микробиологические продукты группы экстрасол. БисолбиСан – биофунгицид, подавляющий развитие фитофтороза, пероноспороза, мучнистой росы, фузариоза, церкоспороза, гельминтоспориоза, черной ножки и корневой гнили. БисолбиФит – микробиологическое удобрение, повышающее урожайность

сельскохозяйственных культур путем фиксации молекулярного азота и его дальнейшей поставки органам растений. Под его воздействием происходит синтез ростостимулирующих веществ и витаминов, улучшается питание растений и появляется антистрессовый эффект. БисолбиМикс – комплексное удобрение на микробиологической основе, оно содержит грибы арбускулярной микоризы, ризобактерии, клубеньковые бактерии, улучшающие минеральное питание растений, фиксируя азот из атмосферы и препятствуя развитию фитопатогенных бактерий и вирусов [21]. Кроме того, *B. subtilis* лежит в основе производимых препаратов, таких как микорад (повышающий микробиологическую активность почвы и обеззараживающий почву от плесневых и фитопатогенных грибов, болезнетворных бактерий, способствующий снижению поражаемости растений корневыми гнилями, увяданием, мучнистой росой, фитофторозом), алирин-Б (способствующий предотвращению возникновения фитофтороза, альтернариоза, корневых гнилей, мучнистой росы, аскохитоза, серой гнили), гамаир (предотвращающий пятнистости на листьях, бактериальные гнили, паршу, монилиоз, бактериальный рак, сосудистый и слизистый бактериозы) и другие.

Как и многие виды рода *Bacillus*, способные вырабатывать антибиотики, гормоны и гормоноподобные соединения, *B. subtilis* может синтезировать ауксин, который стимулирует более быстрое развитие корневой системы. Поглощенной воды становится больше и критические пороги проходят быстрее и с меньшими потерями [22]. В США *B. subtilis* предоставлен статус Generally regarded as safe (GRAS), допускающий возможность использовать его в сельском хозяйстве, ветеринарии и медицинских целях [23].

Помимо бактериальных, грибковых и вирусных патогенов большое воздействие на сельское хозяйство оказывают насекомые-вредители. Противостоять их негативному воздействию можно с помощью вида *B. thuringiensis*, который является значимым представителем рассматриваемого рода. Применение грамположительных бактерий *B. thuringiensis* для борьбы с насекомыми, представляющими интерес для человека, в последнее время набрало обороты в связи с увеличением спроса на продукты питания, свободные от химических пестицидов, и с внедрением методов ведения сельского хозяйства, которые наносят меньший ущерб окружающей среде [24]. *B. thuringiensis* широко используется в качестве биопестицида в лесном и сельском хозяйстве, поскольку способен производить мощные видоспецифичные инсектицидные токсины и считается непатогенным для других животных [25].

Биоинсектицидная активность обусловлена способностью бактерий синтезировать кристаллические белковые токсины в процессе споруляции, известные как δ -эндотоксины (ICP), или Cry-белки. При попадании в организм насекомого белковый кристалл растворяется в щелочной среде кишечного сока; растворенные протоксины превращаются в «истинные токсины»; затем происходит обратимое связывание «истинного токсина» с соответствующим белком (рецептором), выступающим на поверхности апикальных мембран эпителиальных клеток кишечника насекомого. Энтомопатогенные свойства проявляются при интенсивном размножении бактерий в кишечнике чувствительных видов насекомых [26]. Некоторые разновидности выделяют термостабильный бета-экзотоксин, который в комбинации со спорокристаллическим комплексом усиливает энтомоцидный эффект и расширяет спектр действия [27]. В связи с этим *B. thuringiensis* применяются в качестве местных пестицидов для защиты сельскохозяйственных культур. Различные штаммы *B. thuringiensis* вырабатывают разнообразные типы токсинов, каждый из которых направлен на уничтожение определенной

узкой таксономической группы насекомых. В последнее время эти белки также были интегрированы в генетически модифицированные растения для придания им врожденной устойчивости к вредителям.

На основе *B. thuringiensis* был создан первый биопестицид, который до сих пор является одним из самых востребованных и применяемых видов в России. *B. thuringiensis* активно используется в качестве микробного инсектицида с 1901 г. и до сих пор широко используется для борьбы с насекомыми-вредителями, являясь важным компонентом при изготовлении препаратов в сельском, лесном хозяйстве и медицине. В 1960-х гг. произошло усовершенствование штаммов бактерий, которое привело к замене ранних продуктов новыми штаммами *B. thuringiensis*, которые стали в 10 раз мощнее, чем их предшественники, а поиск новых и лучших штаммов продолжается и по сей день. К настоящему времени разработано более 100 биоинсектицидов на его основе [28]. Кроме того, активно используются трансгенные культуры *B. thuringiensis*, которые оказались чрезвычайно действующими, что приводит к повышению урожайности [29].

B. thuringiensis считается ассоциированным с растениями и относится к группе PGPR (Plant Growth Promoting Rhizobacteria), они являются эндофитами, увеличивающими устойчивость растений к патогенам, посредством взаимодействия с корневой системой. Некоторые штаммы *B. thuringiensis* способствуют стимуляции роста растений, колонизируя их корни. Ростстимулирующее воздействие происходит через продукцию индол-три-уксусной кислоты, АСС-деаминазы и фосфатосо-любилизирующего фермента (PSE) и сидерофора (SD) [30].

Полифункциональные свойства *B. thuringiensis* создают большие возможности для применения этой энтомопатогенной бактерии как ростостимулятора и индуктора защитных механизмов растений против болезней. Однако до сих пор исследования в этом направлении проводили в основном на штаммах *B. thuringiensis*, которые являются продуцентами коммерческих бактериальных инсектицидов *B. thuringiensis* ssp. *thuringiensis*, *kurstaki*, *darmstadiensis*, а в настоящее время известно о более чем 80 подвидах *B. thuringiensis* [31].

B. thuringiensis эффективны против широкого спектра насекомых, в том числе многих вредителей сельскохозяйственных культур и паразитов человека [32, 33], *B. thuringiensis* является наиболее успешным микробным инсектицидным агентом, и его белки изучались в течение многих лет из-за его токсичности в отношении насекомых. В результате этих исследований выявлено, что наиболее восприимчивыми к *B. thuringiensis* являются представители отряда чешуекрылых (*Lepidoptera*), некоторых двукрылых (*Diptera*), перепончатокрылых (*Hymenoptera*) и жесткокрылых (*Coleoptera*), которые являются вредителями медико-ветеринарного значения сельского и лесного хозяйства. Также выделены штаммы, защищающие растения от нематод и клещей [34]. Однако исследования взаимодействия этой бактерии с видами насекомых, отнесенными к отряду *Coleoptera*, более ограничены по сравнению с другими отрядами [35]. Такой широкий диапазон восприимчивых групп обуславливается присутствием в препаратах экзотоксина наряду со спорово-кристаллическим комплексом. Сравнительно недавно была установлена разновидность *B. thuringiensis*, подвид *israelensis*, обладающая специфическим действием на личинок двукрылых насекомых, что открыло путь к новой сфере применения – против кровососущих комаров и мошек в местах их вышлода, то есть в водоемах различного типа, а также против рисового и шампиньонного комариков [36].

Препараты на основе *B. thuringiensis* занимают 90% рынка РФ в отношении целевых насекомых. Благодаря своей специфической токсичности он не представляет опасности для непатогенных организмов. Пестициды на основе Cry-белков обычно имеют низкие затраты на разработку и регистрацию. Например, стоимость разработки *B. thuringiensis subsp. israelensis* оценивается в 1/40 от стоимости сопоставимого нового синтетического химического пестицида [37]. Препараты на основе *B. thuringiensis* входят в Государственный каталог пестицидов и агрохимикатов, разрешенных к применению на территории Российской Федерации от 5 июня 2023 г. [38].

На основе этой бактерии в ФГБНУ ВНИИСХМ разработан ряд препаратов. *B. thuringiensis var. thuringiensis* используется в битоксибациллине, который эффективен против колорадского жука, паутиных клещей и трипсы. Лепидоцид борется с гусеницами бабочек, молей, плодояжорок и прочих летающих вредителей. Ксантрел помогает от личинок колорадского жука, листогрызущих вредителей и фитофтороза. Бацитурин применяют от колорадского жука, капустной моли, паутинового клеща. Препарат бацикол на основе спорово-кристаллического комплекса и эндотоксина *B. thuringiensis var. darmstadiensis* эффективен для борьбы с жесткокрылыми, обладает фунгицидным действием в отношении некоторых фитопатогенных грибов [39]. Препарат бактокулицид на основе *B. thuringiensis var. israelensis* эффективен против кровососущих и растительноядных комаров [40], а также созданы дендробациллин, актинин, бактороденцид и множество других препаратов [41].

Препараты на основе *B. thuringiensis* не приносят негативных эффектов человеку и теплокровным животным и безопасны при попадании в водные ресурсы и ландшафты, так как вносят вклад в уменьшение пестицидной нагрузки, благодаря чему гарантируют получение экологически чистой продукции от сельскохозяйственных производителей [42].

В последние десятилетия палочка *Bacillus megaterium* вызвала значительный интерес в биотехнологической промышленности благодаря своей высокой способности производить белок и стимулировать рост растений. Хотя многие белки до сих пор эффективно экспрессировались с использованием оптимизированной системы, индуцируемой ксилозой, существует значительная потребность в новых промоторах с различной активностью, особенно для регулирования уровней белка в мультиферментных каскадах [43]. *B. megaterium* – грамположительная, в основном аэробная, спорообразующая бактерия, встречающаяся в самых разнообразных средах обитания, но особенно известна своим обилием в почве. В 1884 г. Де Бари назвал *B. megaterium* «большим зверем» из-за ее крупных размеров, примерно в 100 раз превышающих объем *Escherichia coli*. *B. megaterium* промышленно культивируется более 50 лет, т. к. обладает очень полезными и необычными ферментами и высокой способностью производить экзоферменты. *B. megaterium* может расти в простых средах на более чем 62 источниках углерода из 95 протестированных, включая соединения цикла трикарбоновых кислот, формиат и ацетат. Среди его продуктов такие белки, как пенициллинацилаза, используемые для производства синтетических пенициллинов и различных амилаз. Кроме того, он используется для производства пирувата, витамина B₁₂, фунгицидных токсинов и оксетаноцина [44].

Результаты [45] показывают, что *B. megaterium* может продуцировать различные метаболиты, такие как бутандиол, циклические дипептиды, жирные кислоты и углеводороды, с разнообразными, а иногда и противоположными эффектами, чтобы модулировать свою реакцию на рост растений и адаптироваться к различным воздействиям окружающей среды.

Эти результаты дают новое представление о биоактивных свойствах этого вида для терапевтического использования на растениях.

Исследования [46] показывают, что инокуляция растений пшеницы засухоустойчивым штаммом *B. megaterium* (MU2) приводит к достижению генетического улучшения пшеницы по устойчивости к засухе, которая в нынешних климатических условиях отрицательно влияет на урожайность данной культуры.

Препараты, производимые на основе *B. megaterium*, включают в себя terra – жидкий препарат с длительным действием, предназначенный для разложения недоступных форм фосфора в почве и улучшения питания растений фосфором и калием, геостим фит – микробиологическое удобрение с широким спектром действия, обладающее фунгицидными и стимулирующими свойствами; фосфобактерин – препарат, способствующий превращению нерастворимых форм кальция, железа и алюминия в доступную для растений форму и стимулирующий рост корней.

Помимо создания засухоустойчивых культур, род *Bacillus* используется для преодоления эффекта засоления. Засоление почвы представляет собой один из основных абиотических факторов, препятствующих развитию и урожайности сельскохозяйственных культур. Растения отвечают на стресс, вызванный засолением, с помощью различных морфофизиологических, молекулярных и биохимических механизмов, однако необходимо совершенствовать эти механизмы для более эффективного преодоления данного вида стресса. Поэтому применение стимуляторов роста растений (PGP) и галотолерантных бактерий считается эффективным способом повышения роста и устойчивости растений. Примером таких бактерий может выступать *Bacillus safensis*.

Эндофитные бактерии *B. safensis* обладают широким диапазоном сред обитания, некоторые из которых являются трудными для выживания других бактериологических микроорганизмов. Эти организмы способны колонизировать широкий спектр сред обитания благодаря уникальным физиологическим характеристикам, таким как высокая толерантность к соли, тяжелым металлам, ультрафиолетовому и гамма-излучению, стимулировать рост растений и устойчивость к соли [47]. Штамм *B. safensis* PM22 вырабатывает большое количество экзополисахаридов, индол-три-уксусной кислоты, сидерофора и дезаминазы 1-аминоциклопропан-1-карбоновой кислоты (ACC-деаминазы) в условиях повышенной соли. Кроме того, инокуляция галотолерантных бактерий PM22 снижает воздействие солевого стресса на растения, способствуя увеличению длины корней и побегов при варьируемых концентрациях соли (0, 180, 240 и 300 мМ) [48].

B. safensis первоначально был обнаружен как загрязнитель космического аппарата (SAF) в США и был назван *safensis* в честь этого. Штаммы *B. safensis* способны производить важные промышленные ферменты, каротиноиды, биосурфактанты, используемые для стимуляции роста растений, а также в качестве средства биологического контроля, противодействующего фитопатогенным грибам [49].

В исследовании [50] охарактеризовали штамм ZY16 *B. safensis* как эндофитную бактерию, которая может разлагать углеводороды, производить биоповерхностно-активные вещества, переносить соль и способствовать росту растений, а также быть полезным для облегчения фиторемедиации загрязненных нефтью почв с высоким засолением.

Анализ генома штамма *B. safensis* RGM 2450 показал, что он обладает потенциалом синтезировать биологически активные соединения, такие как набор нерибосомальных

пептидов, поликетиды, внеклеточные ферменты и фитогормоны. Он также продемонстрировал способность солюбилизировать фосфор, фиксировать азот и производить индолуксусную кислоту [51].

Помимо того, что представители рода *Bacillus* используются в качестве основы биопрепаратов фитопатогенного (противовирусного, антибактериального или антифунгального) действия, они также эффективны для создания биоудобрений, что прежде всего связано с долгим сроком жизни и высокой устойчивостью к повреждающим действиям спор, а также способностью повышать доступность для растений элементов питания. Так, в собственных исследованиях ВолНИЦ РАН доказана эффективность применения препаратов Натурост (основа *B. subtilis*) и Натурост-М (основа *B. megaterium*). Показано, что под действием данных биопрепаратов выход зеленой и сухой массы клеверотимофеечной травосмеси возрастал на 17–32% и 21–30% соответственно [52, 53].

Выводы. В роде *Bacillus* обнаружено большое разнообразие природных штаммов, привлекающих внимание исследователей своей способностью к продуцированию большого количества различных вторичных метаболитов [54]. Эти бактерии используются для получения четырех типов продуктов, таких как антибиотики, ферменты, инсектициды и высокоочищенные биопрепараты. Они способны продуцировать метаболиты, стимулирующие рост и развитие растений, а также индуцировать их иммунитет [55].

Как и многие эндофитные бактерии, обладающие способностью синтезировать антибиотики, большинство бактерий из рода *Bacillus* синтезирует полимиксин циркулин и колистин, которые подавляют рост множества фитопатогенных грибов, грамотрицательных и грамположительных бактерий [56]. Штаммы *Bacillus* sp. культивируются для производства ферментов – протеиназы и амилазы; рекомбинантных белков, антимикробных соединений, бактериоцинов, пептидных и липопептидных антибиотиков. Продуктами синтеза бактерий являются адсорбенты, инсектициды, поверхностно-активные соединения, витамины, пуриновые нуклеозиды, полигамма-глутаминовая кислота и другие вещества. Бактерии рода *Bacillus* способны переводить нерастворимый трикальций фосфат в доступную для растений форму, что улучшает их режим питания.

Таким образом, род *Bacillus* имеет высокий промышленный потенциал в том числе и для сельского хозяйства. Представители данного рода способны подавлять развитие фитопатогенов (возбудителей бактериальных и/или грибных инфекций) и оказывать ростостимулирующее действие на сельскохозяйственные культуры. Проанализировав исследования о широком применении микроорганизмов в сельском хозяйстве, можно сделать вывод о том, что применение штаммов *Bacillus* sp. – перспективное направление, способствующее совершенствованию технологий растениеводства. Оно поможет модернизировать работу АПК как с финансовой точки зрения (экономические более выгодно по сравнению с другими средствами защиты и стимуляторами роста), так и экологической составляющей. Для поддержания экологической безопасности и сохранения экономической выгоды ведения сельскохозяйственного производства рекомендуется комплексное, гармоничное применение химических и биологических препаратов [57]. Следовательно, не теряет актуальности поиск новых штаммов, которые бы обладали необходимыми свойствами для расширения областей применения. Кроме того, выявлена необходимость в проведении дальнейшего более подробного изучения свойств как отдельных штаммов *Bacillus* sp., так и их совместного действия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петров, В.Б. Микробиологические препараты – базовый элемент современных интенсивных агротехнологий растениеводства // Достижения науки и техники АПК. – 2011. – № 8. – С. 11–12.
2. Perez-Garcia, A. Romero, D. Vicente, A. (2011) ‘Plant protection and growth stimulation by microorganisms: biotechnological application of *Bacilli* in agriculture’, *Curr. Opin. Biotechnol.*, pp. 1–7.
3. Шеламова, Н.А. Влияние санкций на развитие сельского хозяйства и агропродовольственного рынка России // Экономика, труд, управление в сельском хозяйстве. – 2023. – № 9 (103). – С. 45–53. – DOI: 10.33938/239-45.
4. Петров, В.Б., Чеботарь, В.К., Казаков, А.Е. Микробиологические препараты в биологизации земледелия России // Достижения науки и техники АПК. – 2002. – № 10. – С. 16–20.
5. Мишустин, Е.Н. Микроорганизмы и продуктивность земледелия // М.: Наука, 1972. – 343 с.
6. Mishustin, E.N., Naumova, A.N. (1962), ‘Bacterial fertilizers, their effectiveness and mode of action, *Microbiology*’, vol. 31, pp. 442.
7. Husz, V. (1930), Field experiments on the application of *Bacillus thuringiensis* against the corn borer. *Int. Corn Borer Invest.* no.3, pp. 91–98.
8. Cooper, R. (1959) ‘Bacterial fertilizers in the Soviet Union Soils’, *Soils Fertilizers*, vol. 22, p. 327.
9. Владимиров Л.Н., Неустроев М.П., Тарабукина Н. П. Арктические штаммы *Bacillus subtilis* в современной микробиотехнологии // Ветеринария и кормление. – 2020. – № 2. – С. 17–20. – DOI: 10.30917/АТТ-ВК-1814-9588-2020-2-4.
10. Рассохина, И.И., Платонов, А.В. Проблема повышения продуктивности зерновых культур Вологодской области // Молодые ученые – экономике региона: материалы XX международной научно-практической конференции, Вологда, 25–27 ноября 2020 года. – Вологда: Вологодский научный центр Российской академии наук, 2021. – С. 337–341.
11. Круглов, Ю.В., Лисина, Т.О. Интродукция в почву *Bacillus megaterium* 501^{RF}: факторы, влияющие на выживание, спорообразование и разложение гербицида прометрина // Сельхозбиология. – 2014. – № 5. – С. 107–112.
12. Эндифитные бактерии как перспективный биотехнологический ресурс и их разнообразие / Чеботарь, В.К. [и др.] // Сельскохозяйственная биология. – 2015. – № 5 (50). – С. 648–654. – DOI: 10.15389/agrobiology.2015.5.648rus.
13. Дунайцев, И.А., Лев, И.О., Клыкова, М. В. Эффективность использования штамма *Bacillus toyjaviensis* Lhv-97 для повышения урожайности пшеницы // Агрехимия. – 2017. – № 4. – С. 76–82.
14. Логинов, О.Н., Мелентьев, А.И., Бойко, Т.Ф., Галимзянова, Н.Ф., Свешникова, Е.В. Роль бактерий-антагонистов фитопатогенов в защите сельскохозяйственных растений от болезней. // Уфа: Гилем, 2001. – 66 с.
15. Семенов, С.С., Былгаева, А.А. Перспективы применения спорообразующих бактерий рода *Bacillus* в сельском хозяйстве Якутии // МНИЖ. – 2015. – № 5 (36). – С. 100–102.
16. Максимов, И.В., Максимова, Т.И., Сарварова, Е.Р., Благова, Д.К. Эндифитные бактерии как агенты для биопестицидов нового поколения // Прикладная биохимия и микробиология. – 2018. – № 2 (54). – С. 134–148.
17. Закатаева, Н.П., Юсупова, Ю.Р., Романенков, Д.В., Лившиц, В.А. Современные методы генетического конструирования промышленных штаммов на основе бактерий рода *Bacillus* // Биотехнология. – 2013. – № 5 (29). – С. 8–23.
18. Гребенщикова, А.В. Иркитова, А.Н. Оценка антагонистической активности некоторых штаммов *Bacillus subtilis*, перспективных для использования в сельском хозяйстве // Научные инновации – аграрному производству: материалы международной научно–практической конференции, посвященной 100–летию юбилею Омского ГАУ, Омск, 21 февраля 2018 года. – Омск: Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, 2018. – С. 1227–1231. – ISBN 978-5-89764-708-8.
19. Повышение устойчивости пшеницы к абиотическим стрессам эндифитным штаммом *Bacillus subtilis* / Р. М. Хайруллин [и др.] // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2007. – № 2 (65). – С. 129–134.
20. Орлова, Т.Н., Иркитова, А.Н., Гребенщикова, А.В. Антагонистическая активность *Bacillus subtilis* // Вестник АГАУ. – 2018. – № 5 (163). – С. 141–145.

21. Фатина, П.Н. Применение микробиологических препаратов в сельском хозяйстве // Нефтегазовые технологии и экологическая безопасность. – 2007. – № 4. – С. 38–44.
22. Kilian, M., Steiner, U., Krebs, B., Junge, H., Schmeiedeknecht, G., Hain, R. (2000), *Bacillus subtilis* – mode of action of microbial agent enhancing plant vitality, *Pflanzenschutz-Nachrichten Bayer*, no.1, pp. 72–93.
23. Rosenblueth, M., Martínez-Romero, E. (2006), Bacterial endophytes and their interactions with hosts, *Mol. Plant–Microbe Interact*, V. 19, 827–837.
24. Лозовская, М.В. и др. Оценка лепидоцидной активности биологических препаратов на основе штаммов *Bacillus thuringiensis* // ТППП АПК. – 2014. – №4. – С. 82–87.
25. Celandroni, F, Salvetti, S, Senesi, S, Ghelardi, E. (2014), *Bacillus thuringiensis* membrane-damaging toxins acting on mammalian cells. *FEMS Microbiol Lett*, no. 361(2), pp. 95–103, DOI: 10.1111/1574-6968.12615.
26. Melo, A.L., Soccol, V.T., Soccol, C.R. (2016), *Bacillus thuringiensis*: mechanism of action, resistance, and new applications: a review. *Crit Rev Biotechnol*. no. 36(2), pp. 317–326, DOI: 10.3109/07388551.2014.960793.
27. Белоусова М.Е., Гришечкина С.Д., Ермолова В.П. и др. Секвенирование генома штамма *Bacillus thuringiensis* var. *darmstadiensis* 56 и изучение инсектицидной активности биологического препарата на его основе // Сельскохозяйственная биология. – 2020. – Т. 55, № 1. – С. 87–96. – DOI: 10.15389/agrobiology.2020.1.87rus.
28. Шведчикова, В.М., Яценко, С.Н. Использование *Bacillus thuringiensis* в сельском хозяйстве // Успехи молодежной науки в агропромышленном комплексе: Сборник трудов LVII Студенческой научно-практической конференции, Тюмень, 30 ноября 2022 года. – Тюмень: Государственный аграрный университет Северного Зауралья, 2022. – С. 295–301.
29. Georgina, S., Raviraj, B., Richard, M. T., Teresa, C., Paul, C. (2011), *Bacillus thuringiensis*: a century of research, development and commercial applications. *Plant Biotechnology Journal*. Vol. 9, Issue 3, pp. 283–300. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7652.2011.00595.x>
30. Крыжко, А.В., Смаглий, Н.Н. Влияние штаммов *Bacillus thuringiensis* на ростовые и метаболические процессы в проростках *Pisum sativum* L. // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. – 2022. – № 4 (43). – С. 557–565.
31. Горобей И.М., Калмыкова Г.В., Давыдова Н.В., Андреева И.В. Штаммы *Bacillus thuringiensis* с ростостимулирующей и фунгицидной активностью // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. – 2018. – № 48 (6). – С. 5–12. <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2018-6-1>.
32. Wu, S, Zhong, J, Lei, Q, Song, H, Chen, S., Wahla, A., Bhatt, K., Chen, S. (2023), New roles for *Bacillus thuringiensis* in the removal of environmental pollutants. *Environ Res*. no. 1, pp. 223, DOI: 10.1016/j.envres.2023.116699.
33. Пархоменко, А.Л. Пархоменко, Т.Ю. Лесовой Н.М. Влияние энтомопатогенных бактерий *Bacillus thuringiensis* на заселенность растений капусты *Brevicoryne brassicae* L // Ученые записки Таврического национального университета имени В.И. Вернадского. Серия: Биология, химия. – 2009. – Т. 22 (61), № 3. – С. 95–100.
34. Santos, E.N. et al. (2022), ‘*Bacillus thuringiensis*: From biopesticides to anticancer agents’, *Biochimie*, no. 19, pp. 83–90, DOI: 10.1016/j.biochi.2021.10.003.
35. Domínguez-Arrizabalaga M., Villanueva, M., Escriche, B., Ancín-Azpilicueta, C., Caballero, P. (2020) Insecticidal Activity of *Bacillus thuringiensis* Proteins Against Coleopteran Pests. *Toxins* (Basel). 12(7), 430, DOI: 10.3390/toxins12070430.
36. Смирнов О.В., Гришечкина С.Д. Проблемы стабилизации ценных свойств штаммов *Bacillus thuringiensis*-продуцентов ларвицидных биопрепаратов // Вестник защиты растений. – 2009. – № 1. – С. 26–34.
37. Schnepf, E., Crickmore, N., Van Rie, J., Lereclus, D., Baum, J., Feitelson, J., Zeigler, D. R., Dean, D. H. (1998), *Bacillus thuringiensis* and Its Pesticidal Crystal Proteins. *Microbiol Mol Biol*. no. 62, pp. 23–45, DOI: <https://doi.org/10.1128/mmbr.62.3.775-806.1998>
38. Государственный каталог пестицидов и агрохимикатов, разрешенных к применению на территории Российской Федерации // Москва. – 2023. – 924 с.
39. Долженко О.В., Кривченко О.А., Белоусова М.Е., Долженко Т.В. Микробиологические инсектициды для защиты картофеля // Научное обеспечение развития АПК в условиях импортозамещения: Сборник научных трудов международной научно-практической

- конференции профессорско-преподавательского состава «Научное обеспечение развития сельского хозяйства и снижение технологических рисков в продовольственной сфере»: в 2-частях, Санкт-Петербург, 26–28 января 2017 года. Том Часть I. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, 2017. – С. 47-50.
40. Ермолова В.П., Гришечкина С.Д., Рахман А.М., Антонец К.С., Белоусова М.Е., Яхно В.В., Нижников А.А. инсектицидные свойства *Bacillus thuringiensis var. israelensis*. Сообщение I: спектр действия ларвицидного препарата на основе производственного штамма 7-1/23А // Сельскохозяйственная биология, 2019. – Т. 54, № 6, – С. 1267–1280.
 41. Добрица, А.П., Корецкая, Н.Г., Гайтан, В.И., Коломбет, Л.В., Дербышев, В.В., Жиглецова, С.К. Разработка биопестицидов против колорадского жука // Российский химический журнал. – 2001. – Т. 45, № 6. – С. 174–184.
 42. Разумкова, Г.М. Биологические альтернативы химическим пестицидам и минеральным удобрениям // XVI Вишняковские чтения. Проблемы и перспективы развития высшего профессионального образования в регионе на современном этапе: материалы международной научной конференции, Бокситогорск, 29 марта 2013 года. Том XVI. – Бокситогорск: Ленинградский государственный университет им. А.С. Пушкина, 2013. – С. 177–180.
 43. Hartz, P., Mattes, C., Schad, M., Bernhardt, R., Hannemann, F. (2019), Expanding the promoter toolbox of *Bacillus megaterium*. *J Biotechnol.* Vol. 20; no. 294, pp. 38–48, DOI: 10.1016/j.jbiotec.2019.01.018.
 44. Vary, P.S., Biedendieck, R., Fuerch, T. (2007), ‘*Bacillus megaterium* – from simple soil bacterium to industrial protein production host’, *Appl Microbiol Biotechnol*, no. 76, pp. 957–967. doi.org/10.1007/s00253-007-1089-3.
 45. Hur, A., Saoudi, M.M., Ferhout, H., Mzali, L., Taillandier, P., Bouajila, J. (2024), *Bacillus megaterium*: Evaluation of Chemical Nature of Metabolites and Their Antioxidant and Agronomics Properties. *Int J Mol Sci.* no. 25(6), pp. 32–35, DOI: 10.3390/ijms25063235.
 46. Rashid, U. et al. (2022), Drought-tolerant *Bacillus megaterium* isolated from semi-arid conditions induces systemic tolerance of wheat under drought conditions. *Plant Cell Rep.*, no. 41(3), pp. 549–569, DOI: 10.1007/s00299-020-02640-x.
 47. Chebotar, V.K., Zaplatkin, A.N., Chizhevskaya, E.P., Gancheva, M.S., Voshol, G.P., Malfanova, N.V., Baganova, M.E., Khomyakov, Y.V., Pishchik, V.N. (2023), Phytohormone Production by the Endophyte *Bacillus safensis* TS3 Increases Plant Yield and Alleviates Salt Stress. *Plants (Basel)*, no. 13(1), pp. 75, DOI: 10.3390/plants13010075.
 48. Azeem, M.A., Shah, F.H., Ullah, A., Ali, K., Jones, D.A., Khan, M.H., Ashraf, A. (2022), Biochemical Characterization of Halotolerant *Bacillus safensis* PM22 and Its Potential to Enhance Growth of Maize under Salinity Stress. *Plants (Basel)*. no. 11(13), pp. 1721, DOI: 10.3390/plants11131721.
 49. Пунина, Н.В., Зотов, В.С., Пархоменко, А.Л., Пархоменко, Т.Ю., Топунов, А.Ф. Изучение генетического разнообразия *Bacillus thuringiensis*, выделенных в различных эколого-географических зонах Украины, при помощи анализа генов 16S рРНК, *gyrB* и методов ар-пцр и saAFLP // *Acta Naturae*. – 2013. – № 1 (16). – С. 93–103.
 50. Wu, T. et al. (2019) ‘Characterization and Initial Application of Endophytic *Bacillus safensis* Strain ZY16 for Improving Phytoremediation of Oil-Contaminated Saline Soils’, *Front Microbiol*, no. 7, p. 991. DOI: 10.3389/fmicb.2019.00991.
 51. Altimira, F. et al. (2022) ‘Genomic and Experimental Analysis of the Biostimulant and Antagonistic Properties of Phytopathogens of *Bacillus safensis* and *Bacillus siamensis*’, *Microorganisms*, no. 10 (4), p. 670. DOI: 10.3390/microorganisms10040670.
 52. Продуктивность клеверотимофеечной травосмеси при использовании микробиологических препаратов / И. И. Рассохина [и др.] // *Аграрный научный журнал*. – 2023. – № 1. – С. 41–47.
 53. Платонов, А.В., Ерегина, С.В., Рассохина, И.И. Реакция ярового ячменя на внесение экспериментального биопрепарата // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. – 2023. – № 10 (228). – С. 5–10. – DOI: 10.53083/1996-4277-2023-228-10-5-10.
 54. Гребенщикова, А.В. Сравнение антагонистической активности коллекционных и ризосферных штаммов *Bacillus subtilis* // *Биотехнология и общество в XXI веке: Сборник статей / Под редакцией М.М. Силантьевой*. – Барнаул: Алтайский государственный университет, 2018. – С. 39–46.
 55. Figueiredo, M.D. et al. (2010) ‘Plant growth promoting rhizobacteria: fundamentals and applications’, *Plant growth and health promoting bacteria*, no. 18, pp. 21–43.

56. Эндофитные микроорганизмы в фундаментальных исследованиях и сельском хозяйстве / Е. Н. Васильева [и др.] // Экологическая генетика. – 2019. – № 1. – С. 19–32.
57. Петровский, А.С., Каракотов, С.Д. Микробиологические препараты в растениеводстве. Альтернатива или партнерство? // Защита и карантин растений. – 2017. – № 2. – С. 14–18.

REFERENCES

- Petrov, V.B. (2011) 'Microbiological preparations as the basis element of intensive agrotechnologies in crop production', *Achievements of science and technology in agro-industrial complex*, no. 3, pp.11–12. (In Russ.)
- Perez-Garcia, A. Romero, D. Vicente, A. (2011), 'Plant protection and growth stimulation by microorganisms: biotechnological application of *Bacilli* in agriculture', *Curr. Opin. Biotechnol.*, 1–7.
- Shelamova, N.A. (2023) 'The impact of sanctions on the development of agriculture and the agro-food market in Russia', *Economy, labor, management in agriculture*, no. 9 (103). pp. 45–53. – DOI: 10.33938/239-45. (In Russ.)
- Petrov, V.B., Chebotar', V.K., Kazakov, A.E. (2002), 'Microbiological preparations in biologization of agriculture in Russia', *Achievements of science and technology in agro-industrial complex*, no. 10, pp. 16–20. (In Russ.)
- Mishustin, E.N. (1972) *Microorganisms and crop productivity*, Moscow: Nauka, p. 343. (In Russ.)
- Mishustin, E.N., Naumova, A.N. (1962) 'Bacterial fertilizers, their effectiveness and mode of action', *Microbiology*, no. 31, pp. 442.
- Husz, B. (1930), 'Field experiments on the application of *Bacillus thuringiensis* against the corn borer', *Int. Corn Borer Invest.* 3, pp. 91–98.
- Cooper, R. (1959), 'Bacterial fertilizers in the Soviet Union Soils', *Soils Fertilizers*, no. 22, pp. 327.
- Vladimirov L. N., Neustroev M.P., Tarabukina N.P. (2020), 'Arctic strains of *Bacillus Subtilis* of in modern microbiotechnology', *Veterinaria i kormlenie*, no. 2, pp. 17–20, DOI: 10.30917/ATT-VK-1814-9588-2020-2-4. (In Russ.)
- Rassohina, I.I., Platonov, A.V. (2021) 'Problema povysheniya produktivnosti zernovykh kul'tur Vologodskoj oblasti', *Molodye uchenye – ekonomike regiona: materialy XX mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii*, 25–27 nov. 2020. Vologda: Vologda Research Center of the RAS, pp. 337–341. (In Russ.)
- Kruglov, Yu. V., Lisina, T.O. (2014) '*Bacillus megaterium* 501^{RIF}: introduced into the soil: factors affecting the rate of survival, sporulation and decomposition of the herbicide prometryn', *Agricultural biology*, no. 5, pp. 107–112. (In Russ.)
- Chebotar, V.K. et al. (2015) 'Biodiversity of endophytic bacteria as a promising biotechnological resource', *Agricultural biology*, vol. 50, no. 5, pp. 648–654. DOI: 10.15389/agrobiology.2015.5.648rus. (In Russ.)
- Dunajcev, I.A., Lev, I.O., Klykova, M.V. (2017) 'The efficacy of the strain *Bacillus mojavensis* lhv-97 for increasing wheat yield', *Agrohimia*, no. 4, pp. 76–82. (In Russ.)
- Loginov, O.N., Melent'ev, A.I., Bojko, T.F., Galimzyanova, N.F., Sveshnikova, E.B. (2001), *Roľ bakterij-antagonistov fitopatogenov v zashchite sel'skohozyajstvennykh rastenij ot boleznej*. [Role of phytopathogen antagonist bacteria in the defense of agricultural plants against diseases] // Ufa: «Gilem». 66. (In Russ.)
- Semenov, S.S., Bylgaeva, A.A. (2015) 'Prospects of application of spore-forming bacteria of the genus bacillus in agriculture of Yakutia', *International Research Journal*, no. 36, pp. 100–102. (In Russ.)
- Maksimov, I. V., Maksimova, T. I., Sarvarova, E. R., Blagova, D. K. (2018) 'Endophytic bacteria as effective agents of new-generation biopesticides (review)', *Applied biochemistry and microbiology*, vol. 54, no. 2, pp. 134–148. (In Russ.)
- Zakataeva, N.P., Yusupova, Yu. R., Romanenkov, D.V., Livshic, V.A. (2013) 'Current methods for genetic construction of bacillus-based industrial strains', *Biotechnology in Russia*, vol. 29, no. 5, pp. 8–23. (In Russ.)
- Grebenshchikova, A.V. Irkitova, A.N. (2018) 'Evaluation of antagonistic activity of some strains of *Bacillus subtilis*, promising for use in agriculture', *Scientific innovations – agrarian production: proceedings of the International scientific and practical conference devoted to the 100th anniversary*

- of Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, Omsk, February 21, 2018, pp. 1227–1231, ISBN 978-5-89764-708-8. (In Russ.)
19. Hajrullin, R.M. et al. (2007) ‘Increasing of wheat firmness to abiotic stresses of endophytic strain *Bacillus subtilis*’, *Vestnik of Orenburg State University*, no. 2 (65), pp. 129–134. (In Russ.)
 20. Orlova, T.N., Irkitova, A.N., Grebenshchikova, A.V. (2018), ‘Antagonistic activity of *Bacillus subtilis*’, *Bulletin of Altai State Agricultural University*, no. 5 (163), pp. 141–145. (In Russ.)
 21. Fatina, P.N. (2007), ‘The application of microbiological medications in agriculture’, *Oil and gas technologies and environmental safety*, no. 4, pp. 38–44. (In Russ.)
 22. Kilian, M., Steiner, U., Krebs, B., Junge, H., Schmeiedeknecht, G., Hain, R. (2000), ‘*Bacillus subtilis* – mode of action of microbial agent enhancing plant vitality’, *Pflanzenschutz-Nachrichten Bayer*, no. 1, pp. 72–93.
 23. Rosenblueth, M., Martínez-Romero, E. (2006) ‘Bacterial endophytes and their interactions with hosts’, *Mol. Plant-Microbe Interact*, vol. 19, pp. 827–837.
 24. Lozovskaya, M.V. et. al. (2014) ‘Assessment of lepidotsidny activity of biological preparations on the basis of *Bacillus thuringiensis* strains’, *Technologies of the food and processing industry of the agro-industrial complex-healthy food products*, no. 4, pp. 82–87. (In Russ.)
 25. Celandroni, F, Salvetti, S, Senesi, S, Ghelardi, E. (2014), “*Bacillus thuringiensis* membrane-damaging toxins acting on mammalian cells”, *FEMS Microbiol Lett*, no. 361(2), pp. 95–103, DOI: 10.1111/1574-6968.12615.
 26. Melo, A.L., Soccol, V.T., Soccol, C.R. (2016) ‘*Bacillus thuringiensis*: mechanism of action, resistance, and new applications: a review’, *Crit Rev Biotechnol*, no. 36 (2), pp. 317–326, DOI: 10.3109/07388551.2014.960793.
 27. Belousova, M.E., Grishechkina, S.D., Ermolova, V.P. et al. (2020) ‘Genome sequencing of the strain *Bacillus thuringiensis* var. Darmstadiensis 56 and the study of the insecticidal activity of a biological preparation based on it’, *Agricultural biology*, vol. 55, no. 1, pp. 87–96, DOI: 10.15389/agrobiology.2020.1.87rus. (In Russ.)
 28. Shvedchikova, V.M., Yashchenko, S.N. (2022), ‘Ispol'zovanie *Bacillus thuringiensis* v sel'skom hozyajstve [Use of *Bacillus thuringiensis* in agriculture]’, *Uspekhi molodezhnoj nauki v agropromyshlennomb komplekse* [Proceedings of the LVII Student Scientific and Practical Conference, Tyumen, November 30, 2022, Tyumen: State Agrarian University of Northern Trans-Urals, pp. 295–301. (In Russ.)
 29. Georgina, S., Raviraj, B., Richard, M.T., Teresa, C., Paul, C. (2011) ‘*Bacillus thuringiensis*: a century of research, development and commercial applications’, *Plant Biotechnology Journal*, vol. 9, Issue 3, 283–300. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7652.2011.00595.x>.
 30. Kryzhko, AV., Smaglij, N.N. (2022) ‘Effect of *Bacillus thuringiensis* strains on growth and metabolic processes in *Pisum sativum* l. Sprouts. Proceedings of universities’, *Applied chemistry and biotechnology*, no. 4 (43), pp. 557–565. (In Russ.)
 31. Gorobey, I.M., Kalmykova, G.V., Davydova, N.V., Andreeva, I.V. (2018) ‘Strains of *Bacillus thuringiensis* with growth-stimulating and fungicidal activity’, *Siberian Bulletin of Agricultural Science*, no. 48 (6), pp. 5–12, DOI: <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2018-6-1>. (In Russ.)
 32. Wu, S, Zhong, J, Lei, Q, Song, H, Chen, S., Wahla, A., Bhatt, K., Chen, S. (2023) ‘New roles for *Bacillus thuringiensis* in the removal of environmental pollutants’, *Environ Res*, no. 1, pp. 223, DOI: 10.1016/j.envres.2023.116699.
 33. Parhomenko, A.L. Parhomenko, T.YU. Lesovoj N.M. (2009) ‘Influence of entomopathogenic bacteria *Bacillus thuringiensis* on the infestation of cabbage plants *Brevicoryne brassicae* L.’, *Scientific Notes of V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Historical science Series: Biology, Chemistry*, vol. 22 (61), no. 3, pp. 95–100. (In Russ.)
 34. Santos, E.N. et al. (2022) ‘*Bacillus thuringiensis*: From biopesticides to anticancer agents’, *Biochimie*, no. 19, pp. 83–90, DOI: 10.1016/j.biochi.2021.10.003.
 35. Domínguez-Arrizabalaga M., Villanueva, M., Escriche, B., Ancín-Azpilicueta, C., Caballero, P. (2020) ‘Insecticidal Activity of *Bacillus thuringiensis* Proteins Against Coleopteran Pests’, *Toxins (Basel)*, no. 12 (7), pp. 430, DOI: 10.3390/toxins12070430.
 36. Smirnov, O.V., Grishechkina, S.D. (2009) ‘Problems of stabilizing the valuable properties of *Bacillus thuringiensis* strains producing larvicidal biological products’, *Bulletin of plant protection*, no. 1, pp. 26–34. (In Russ.)

37. Schnepf, E., Crickmore, N., Van Rie, J., Lereclus, D., Baum, J., Feitelson, J., Zeigler, D. R., Dean, D. H. (1998) ‘*Bacillus thuringiensis* and Its Pesticidal Crystal Proteins’, *Microbiol Mol Biol.*, no. 62, pp. 23–45, DOI: <https://doi.org/10.1128/mmbr.62.3.775-806.1998>.
38. Gosudarstvennyj katalog pesticidov i agrohimikatov, razreshennyh k primeneniyu na territorii Rossijskoj Federacii (2023), Moscow, pp. 924. (In Russ.)
39. Dolzhenko, O.V., Krivchenko, O.A., Belousova, M.E., Dolzhenko, T.V. (2017), ‘Microbiological insecticides for the protection of potatoes’, *Scientific support for the development of the agro-industrial complex in conditions of import substitution: Collection of scientific papers of the international scientific-practical conference of professors teaching staff “Scientific support for agricultural development and reducing technological risks in the food sector”*: in 2 parts, St. Petersburg, January 26–28, 2017, Part I. St. Petersburg: SPbSAU, pp. 47–50. (In Russ.)
40. Ermolova, V.P., Grishechkina, S.D., Rakhman, A.M., Antonets, K.S., Belousova, M.E., Yakhno, V.V., Nizhnikov, A.A. (2019) ‘Insecticidal properties of *Bacillus thuringiensis* var. *israelensis*. Message I: spectrum of action of a larvicidal drug based on production strain 7-1/23A’, *Agricultural biology*, T. 54, no. 6, pp. 1267–1280. (In Russ.)
41. Dobrica, A.P., Koreckaya, N.G., Gajtan, V.I., Kolombet, L.V., Derbyshev, V.V., ZHiglecova, S.K. (2001) ‘Development of biopesticides against colorado potato beetle’, *Russian Journal of General Chemistry*, vol. 45, no. 6, pp. 174–184. (In Russ.)
42. Razumkova, G.M. (2013) ‘Biologicheskie al'ternativy himicheskim pesticidam i mineral'nym udobreniyam [Biological alternatives to chemical pesticides and mineral fertilizers]’, *XVI Vishnyakovskie chteniya. Problemy i perspektivy razvitiya vysshogo professional'nogo obrazovaniya v regione na sovremennom etape* [XVI Vishnyakov Readings. Problems and prospects of development of higher professional education in the region at the present stage: proceedings of the international scientific conference, Boksitogorsk, March 29, 2013], vol. XVI. Boksitogorsk: A.S. Pushkin Leningrad State University, pp. 177–180. (In Russ.)
43. Hartz, P., Mattes, C., Schad, M., Bernhardt, R., Hannemann, F. (2019) ‘Expanding the promoter toolbox of *Bacillus megaterium*’, *Biotechnol*, no. 20, pp. 38–48, DOI: [10.1016/j.jbiotec.2019.01.018](https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2019.01.018).
44. Vary, P.S., Biedendieck, R., Fuerch, T. (2007) ‘*Bacillus megaterium* – from simple soil bacterium to industrial protein production host’, *Appl Microbiol Biotechnol*, no. 76, pp. 957–967, <https://doi.org/10.1007/s00253-007-1089-3>.
45. Hur, A., Saoudi, M.M., Ferhout, H., Mzali, L., Taillandier, P., Bouajila, J. (2024), ‘*Bacillus megaterium*: Evaluation of Chemical Nature of Metabolites and Their Antioxidant and Agronomics Properties’, *Int J Mol Sci.* no. 25(6), pp. 32–35, DOI: [10.3390/ijms25063235](https://doi.org/10.3390/ijms25063235).
46. Rashid, U. et al. (2022) ‘Drought-tolerant *Bacillus megaterium* isolated from semi-arid conditions induces systemic tolerance of wheat under drought conditions’, *Plant Cell Rep.*, no. 41(3), pp. 549–569, DOI: [10.1007/s00299-020-02640-x](https://doi.org/10.1007/s00299-020-02640-x).
47. Chebotar, V.K., Zaplatkin, A.N., Chizhevskaya, E.P., Gancheva, M.S., Voshol, G.P., Malfanova, N.V., Baganova, M.E., Khomyakov, Y.V., Pishchik, V.N. (2023), ‘Phytohormone Production by the Endophyte *Bacillus safensis* TS3 Increases Plant Yield and Alleviates Salt Stress’, *Plants (Basel)*, no. 13(1), pp. 75, DOI: [10.3390/plants13010075](https://doi.org/10.3390/plants13010075). (In Russ.)
48. Azeem, M.A., Shah, F.H., Ullah, A., Ali, K., Jones, D.A., Khan, M.H., Ashraf, A. (2022), ‘Biochemical Characterization of Halotolerant *Bacillus safensis* PM22 and Its Potential to Enhance Growth of Maize under Salinity Stress’, *Plants (Basel)*, no. 11(13), p. 1721, DOI: [10.3390/plants11131721](https://doi.org/10.3390/plants11131721).
49. Punina, N.V., Zotov, V.S., Parhomenko, A.L., Parhomenko, T. YU., Topunov, A.F. (2013), ‘Genetic diversity of *Bacillus thuringiensis* from different geo-ecological regions of Ukraine by analyzing the 16s rRNA and GYRB genes and by AP-PCR and SAAFLP’, *Acta Naturae*, no. 1 (16), pp. 93–103. (In Russ.)
50. Wu, T. et al. (2019) ‘Characterization and Initial Application of Endophytic *Bacillus safensis* Strain ZY16 for Improving Phytoremediation of Oil-Contaminated Saline Soils’, *Front Microbiol*, no. 7, p. 991. DOI: [10.3389/fmicb.2019.00991](https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00991).
51. Altimira, F. et al. (2022) ‘Genomic and Experimental Analysis of the Biostimulant and Antagonistic Properties of Phytopathogens of *Bacillus safensis* and *Bacillus siamensis*’, *Microorganisms*, no. 10 (4), p. 670. DOI: [10.3390/microorganisms10040670](https://doi.org/10.3390/microorganisms10040670).

52. Rassohina, I.I. et al. (2023) 'Productivity of the clover and timothy mixture when applying microbiological preparations', *The agrarian scientific journal*, no. 1, pp. 41–47. (In Russ.)
53. Platonov, A.V., Eregina, S.V., Rassohina, I.I. (2023), 'Spring barley response to application of experimental biopreparation', *Bulletin of Altai State Agricultural University*, no. 10 (228), pp. 5–10. DOI: 10.53083/1996-4277-2023-228-10-5-10. (In Russ.)
54. Grebenschikova, A.V. (2018) 'Comparison of antagonistic activity of collection and rhizosphere strains of *Bacillus subtilis*', *Biotechnology and Society in the 21st Century: Collection of articles / Edited by M.M. Silantjeva*, Barnaul, Altai State University, pp. 39–46. (In Russ.)
55. Figueiredo, M.D. et al. (2010) 'Plant growth promoting rhizobacteria: fundamentals and applications', *Plant growth and health promoting bacteria*, vol. 18, pp. 21–43.
56. Vasil'eva, E.N. et al. (2019) 'Endophytic microorganisms in fundamental research and agriculture', *Ecological genetics*, no. 1, pp. 19–32. (In Russ.)
57. Petrovsky, A.S., Karakotov, S.D. (2017), 'Microbiological preparations in plant protection. Alternative or partnership?' *Plant protection and quarantine*, no. 2, pp. 14–18. (In Russ.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Светлана Викторовна Ерегина, кандидат географических наук, старший научный сотрудник лаборатории биоэкономики и устойчивого развития, федеральное государственное бюджетное учреждение «Вологодский научный центр Российской академии наук», г. Вологда, Россия; <https://orcid.org/0000-0001-8136-4663>, SPIN-код: 4282-9161, Scopus author ID: 58553844600, ResearcherID: HWQ-4498-2023; e-mail: ereginasv@mail.ru.

Мария Михайловна Кузнецова, инженер-исследователь лаборатории биоэкономики и устойчивого развития, федеральное государственное бюджетное учреждение наук «Вологодский научный центр Российской академии наук», г. Вологда, Россия; <https://orcid.org/0000-0002-6288-1005>, SPIN-код: 6285-0435, ResearcherID: ACJ-4391-2022; e-mail: 137lidia@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Svetlana V. Eregina, Cand. Sci. (Geographical), Senior Researcher at the Laboratory of bioeconomy and sustainable development, Federal State Budgetary Institution of Sciences «Vologda Research Center of the Russian Academy of Sciences»; <https://orcid.org/0000-0001-8136-4663>, SPIN-code: 4282-9161, Scopus author ID: 58553844600, ResearcherID: HWQ-4498-2023; e-mail: ereginasv@mail.ru.

Maria M. Kuznetsova, Research Engineer at the Laboratory of bioeconomy and sustainable development, Federal State Budgetary Institution of Sciences «Vologda Research Center of the Russian Academy of Sciences», <https://orcid.org/0000-0002-6288-1005>, SPIN-code: 6285-0435, ResearcherID: ACJ-4391-2022; e-mail: 137lidia@gmail.com.

Авторский вклад. Все авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении и анализе данного исследования. Все авторы настоящей статьи ознакомились и одобрили представленный окончательный вариант

Author's contribution. All authors of this research paper have directly participated in the planning, execution, or analysis of this study. All authors of this paper have read and approved the final version submitted

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

The authors declare no conflict of interest

Поступила в редакцию / Received 04.06.2024
Поступила после рецензирования / Revised 22.07.2024
Принята к публикации / Accepted 20.08.2024

Научная статья/Original article

УДК 633.174:631.527

Код ВАК 4.1.2


DOI: 10.24411/2078-1318-2024-3-36-44

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОРРЕЛЯЦИОННОГО АНАЛИЗА В СЕЛЕКЦИИ ЗЕРНОВОГО СОРГО ДЛЯ ЗАСУШЛИВЫХ РЕГИОНОВ

О.П. Кибальник¹ , В.В. Бычкова¹  , А.В. Ерохина¹ 

¹Российский научно-исследовательский и проектно-технологический институт сорго
и кукурузы

г. Саратов, Россия

 bychkova_vv@list.ru


Реферат. Сорго обладает наибольшей устойчивостью к засухе по сравнению с другими злаковыми культурами благодаря широкому спектру адаптационных механизмов: глубокая и разветвленная корневая система; способность к регулированию устьичной проводимости и транспирации для сохранения водного баланса; накопление осмопротекторов, таких как пролин, для защиты клеток от обезвоживания. В литературе отмечено, что не все генотипы этой культуры способны формировать высокие урожаи зерна и биомассы в условиях данного стресса. Поэтому поиск взаимосвязей между морфометрическими, физиологическими, биохимическими признаками и урожайностью зернового сорго для использования их в селекции на повышение продуктивности в засушливых условиях возделывания является актуальным. Изучение комплекса признаков (всего 20) проводилось в 2022 и 2023 гг. на 11 образцах селекции ФГБНУ РосНИИСК «Россорго» по общепринятым методикам. Для выявления сопряженности признаков результаты исследований подвергались корреляционному анализу в программе Агрос 2.09. Метеорологические условия вегетации растений можно охарактеризовать как засушливые: гидротермический коэффициент составил в 2022 г. 0,75; в 2023 г. – 0,69. Таким образом, в практической селекционной работе по выведению новых сортов и гибридов для возделывания в засушливых условиях необходимо учитывать следующие выявленные корреляции: урожайность зерна взаимосвязана со способностью растений сохранять оводненность листьев в экстремальных условиях, причем удержание воды в тканях зависит от длины и площади наибольшего листа, содержания в зерне клетчатки ($r = 0,67-0,72$); вместе с тем параметры наибольшего листа тесно сопряжены с массой 1000 зерен ($r = -0,80...-0,75$).

Ключевые слова: сорго, взаимосвязь, урожайность, зерно, водный режим листьев, биохимический состав

Для цитирования: Кибальник, О.П., Бычкова, В.В., Ерохина, А.В. Использование корреляционного анализа в селекции зернового сорго для засушливых регионов // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2024. – № 3 – С. 36–44. – DOI: 10.24411/2078-1318-2024-3-36-44.

USE OF CORRELATION ANALYSIS IN GRAIN SORGHUM SELECTION
FOR ARID REGIONSO.P. Kibalnik¹ , V.V. Bychkova¹  , A.V. Erohina¹ ¹Russian Research and Design-Technological Institute of Sorghum and Corn

Saratov, Russia

 bychkova_vv@list.ru

Abstract. Due to a wide range of adaptive mechanisms – a deep and branched root system; the ability to regulate stomatal conduction and transpiration to maintain water balance; accumulation of osmoprotectors such as proline to protect cells from dehydration – sorghum has the greatest resistance to drought compared to other cereals crops. It has been noted in the literature that not all genotypes of this crop are able to generate high grain and biomass yields under this stress. Therefore, the search for interrelationships between morphometric, physiological, biochemical traits and grain sorghum yield for their use in selection to increase productivity in dry conditions of cultivation is relevant. The study of the complex of signs (20 in total) was carried out during 2022-2023 on 11 varieties of grain sorghum of the Institute “Rossorgo” selection according to generally accepted methods. To identify the conjugacy of features, the research results were subjected to correlation analysis in the Agros 2.09 program. Meteorological conditions of vegetation of plants can be characterized as arid: the hydrothermal coefficient was 0.75 in 2022; 0.69 in 2023. Thus, in practical selection work on the development of new varieties and hybrids for cultivation in arid conditions, it is necessary to take into account the following identified correlations: grain yield is interrelated with the ability of plants to maintain leaf hydration in extreme conditions, and water retention in tissues depends on the length and area of the largest leaf, the fiber content in the grain ($r = 0.67-0.72$); At the same time, the parameters of the largest leaf are closely related to the mass of 1000 grains ($r = -0.80 - -0.75$).

Keywords: sorghum, interrelation, yield, grain, leaf water regime, biochemical composition

For citation: Kibalnik, O.P., Bychkova, V.V. and Erohina, A.V. (2024) ‘Use of correlation analysis in grain sorghum selection for arid regions’, *Izvestiya of Saint-Petersburg State Agrarian University*, vol. 77, no. 3, pp. 36–44. (In Russ.) DOI: 10.24411/2078-1318-2024-3-36-44.

Введение. В селекции сельскохозяйственных растений широко используются корреляции между хозяйственными, морфометрическими, физиологическими, биохимическими и другими признаками. Корреляционный анализ позволяет обнаружить устойчивую сопряженность между различными признаками и использовать выявленные взаимосвязи в селекционных программах при создании новых сортов и гибридов. В условиях нарастания аридности климата все большую актуальность приобретают культуры, способные формировать достаточно высокую продуктивность в стрессовых условиях [1]. Одним из серьезных абиотических стрессоров считается засуха. Различная реакция сельскохозяйственных растений на этот стресс-фактор позволяет им противостоять и выживать в неблагоприятных условиях [2]. Так, традиционные культуры (пшеница, рис, ячмень и другие) наиболее остро подвержены действию засухи, ее влияние отражается на снижении продуктивности и качества зерна. Другие культуры, такие как сорго, вполне соответствуют предъявляемым современным требованиям: обладают жаростойкостью, засухоустойчивостью, нетребовательны к почвенному плодородию [3–4]. При этом высокая устойчивость растений к абиотическому стрессору обусловлена физиологическими и биологическими особенностями [5]. Однако продолжительность периода недостатка влаги в

сочетании с высокими среднесуточными температурами воздуха может отрицательно влиять на урожайность и пищевую ценность некоторых генотипов сорго на 20–30% [6], что важно учитывать в селекции новых сортов и гибридов. В связи с этим поиск новых взаимосвязей между признаками, отражающими устойчивость к абиотическим стрессорам, качество полученной продукции для использования в дальнейшей селекции, является актуальным. Однако многие исследователи отмечают высокую изменчивость значений коэффициентов корреляций между признаками в зависимости от генотипических особенностей изучаемого материала и условий выращивания.

Цель исследования – определить взаимосвязь морфометрических, физиологических, биохимических признаков и урожайности зернового сорго для ее применения в селекции на повышение продуктивности в засушливых условиях возделывания.

Материал, методы и объекты исследования. В 2022–2023 гг. в качестве объектов использовали 8 сортов (РСК Кахолонг, РСК Коралл, Магистр, Пищевое 614, Кремовое, РСК Инфинити, Кулон, Принц) и 3 перспективных линии (Л-65/14, Л-50/14, Л-251/14) зернового сорго селекции ФГБНУ РосНИИСК «Россорго», различающихся по комплексу селекционных признаков.

Повторность в опыте трехкратная с рендомизированным размещением делянок площадью 30,8 м². Густота стояния растений скорректирована вручную до 100–150 тыс. раст./га. Посев сорго ежегодно проводился в третьей декаде мая селекционной кассетной сеялкой СКС-6-10. Агротехника выращивания – зональная. Закладка делянок и оценка селекционных признаков растений осуществлена согласно методике государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур⁵. Биохимический состав зерна определяли на инфракрасном анализаторе Spectral Star ХТ методом спектроскопии. Белок разделяли на фракции методом экстракции по схеме Т.Б. Осборна с последовательным извлечением их в дистиллированную воду, в 0,5 М раствор хлористого калия, 70% раствор этанола и 0,2% раствор едкого натра⁶. Показатели водного режима листьев определяли в фазу цветения растений сорго⁷. Оводненность тканей листьев (в процентах) – соотношение между разностью массы сырой и сухой навесок, разделенной на массу сырой навески. Водный дефицит (в процентах) – соотношение разности массы листьев после 24-часового насыщения и до их насыщения к разности между массой листьев после 24-часового насыщения и сухой навеской. Потерю воды листьями (в процентах) определяли через 1,5 часа увядания путем взвешивания листьев на электронных весах с последующим расчетом отношения потери воды к ее общему содержанию в листьях до начала опыта. Экспериментальные данные подвергались статистической обработке в программе Agros версии 2.09 методом полного корреляционного анализа и статистического анализа выборки.

Следует отметить, что сезоны возделывания 2022–2023 гг. различались по метеорологическим показателям (температура воздуха и количество осадков) в отдельные декады. Гидротермический коэффициент за период вегетации культуры составил в 2022 г.

⁵ Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур / ред. В.И. Головачев, Е.В. Кириловская. – М.: Государственная комиссия по сортоиспытанию сельскохозяйственных культур, 1989. – 194 с.

⁶ Ермаков А.И., Арасимович В.В., Ярош Н.П. Методы биохимического исследования растений. – Л.: Агропромиздат, 1987. – 430 с.

⁷ Диагностика устойчивости растений к стрессовым воздействиям: методическое руководство под ред. Г.В. Удовенко. – Л., 1988. – С. 49.

0,75; в 2023 г. – 0,69. Особенности климатических условий в период исследований отражены на рисунке 1.

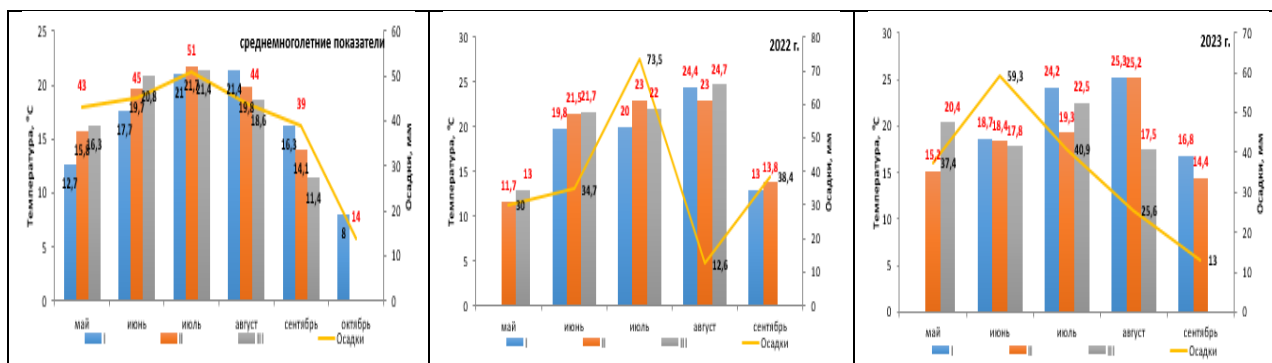


Рисунок 1. Метеорологические условия в период вегетации сорго, 2022–2023 г.
Picture 1. Meteorological conditions during the growing season of sorghum, 2022–2023

Результаты исследования. Результаты статистического анализа экспериментальных данных свидетельствуют о разном варьировании признаков образцов сорго в различные сезоны возделывания. Слабая изменчивость физиологических признаков установлена по оводненности и водоудерживающей способности листьев ($V = 2,6–6,2\%$), что свидетельствует о высокой засухоустойчивости изучаемых образцов (таблица 1).

Таблица 1. Результаты статистического анализа физиологических признаков зернового сорго, 2022–2023 гг.

Table 1. Statistical analysis results of physiological characteristics of grain sorghum, 2022–2023

Признак	Год	Интервал значений	Средняя	Ошибка средней	Коэффициент вариации, %
Оводненность листьев (%)	2022	69,39...75,88	74,14	0,70	3,1
	2023	67,43...77,99	73,10	0,93	4,2
	среднее	71,23...76,75	73,55	0,58	2,6
Водный дефицит (%)	2022	8,81...17,01	13,11	1,02	25,8
	2023	3,77...16,99	7,64	1,15	49,7
	среднее	6,83...14,67	10,38	0,89	28,5
Водоудерживающая способность (%)	2022	79,93...91,99	85,58	1,12	4,3
	2023	79,64...92,65	89,07	1,55	5,8
	среднее	81,43...92,29	86,42	1,63	6,2

Из морфометрических признаков более стабильной оказалась высота растений: коэффициент вариации составил 7,9–8,4% в зависимости от года исследований (таблица 2).

Таблица 2. Параметры статистического анализа морфометрических признаков и урожайности образцов зернового сорго, 2022–2023 гг.

Table 2. Statistical analysis parameters of morphometric characteristics and yield of grain sorghum samples, 2022–2023

Признак	Год	Интервал значений	Средняя	Ошибка средней	Коэффициент вариации, %
Урожайность зерна (т/га)	2022	2,99...5,24	4,37	0,23	17,4
	2023	4,81...9,04	6,15	0,40	21,5
	среднее	4,01...6,72	5,26	0,27	16,8

Продолжение таблицы 2

Урожайность биомассы (т/га)	2022	16,33...23,53	18,28	0,72	13,1
	2023	16,35...29,33	23,99	1,16	16,1
	среднее	16,34...23,87	21,14	0,62	9,6
Высота растений (см)	2022	117,2...148,8	129,5	3,10	7,9
	2023	114,9...149,8	134,6	3,40	8,4
	среднее	119,4...149,3	132,1	2,98	7,5
Длина наибольшего листа (см)	2022	35,8...57,0	46,9	2,25	15,9
	2023	32,3...57,8	45,8	2,24	16,2
	среднее	36,1...56,5	46,4	2,11	15,1
Площадь наибольшего листа (см ²)	2022	122,9...313,7	205,5	20,88	33,7
	2023	103,6...275,5	174,9	16,79	31,8
	среднее	128,4...286,2	194,1	19,68	33,6
Длина соцветия (см)	2022	20,3...27,0	23,9	0,71	9,8
	2023	18,0...27,3	23,2	0,99	14,2
	среднее	19,5...27,2	23,6	0,74	10,4
Масса 1000 зерен (г)	2022	21,8...35,9	28,4	1,24	14,5
	2023	23,8...36,8	30,8	1,18	12,7
	среднее	23,9...35,6	29,6	1,15	12,9

Образцы рабочей коллекции отличались более постоянным содержанием белка ($V=6,7-8,4\%$), крахмала ($V = 1,7-1,9\%$) и БЭВ ($V = 1,4-3,9\%$) в зерне в течение периода исследований. В среднем за 2 года коэффициент вариации описанных признаков оказался в пределах 1,0–7,5% (таблица 3).

Таблица 3. Результаты статистического анализа биохимических показателей зерна сорго, 2022-2023 гг.

Table 3. Statistical analysis results of biochemical parameters of sorghum grain, 2022–2023

Признак	Год	Интервал значений	Средняя	Ошибка средней	Коэффициент вариации, %
Белок	2022	9,24...12,07	10,11	0,26	8,4
	2023	10,22...12,24	11,20	0,23	6,7
	среднее	9,89...11,82	10,66	0,18	5,5
Глобулины	2022	6,71...11,78	9,62	0,59	20,3
Глютелины	2022	8,73...15,99	12,49	0,86	22,9
Проламины	2022	5,75...14,94	9,19	0,91	32,7
Альбумины	2022	12,19...24,21	18,94	1,16	20,3
Жир	2022	3,06...3,48	3,26	0,04	4,4
	2023	2,98...4,51	3,75	0,16	14,4
	среднее	3,02...3,98	3,51	0,10	9,6
Минеральные вещества	2022	0,92...1,49	1,13	0,05	14,9
	2023	0,94...1,53	1,22	0,06	15,4
	среднее	0,99...1,51	1,18	0,05	13,3
Крахмал	2022	71,32...75,73	74,17	0,43	1,9
	2023	70,94...75,24	73,29	0,38	1,7
	среднее	71,13...75,25	73,74	0,38	1,7
Безазотистые экстрактивные вещества	2022	73,13...84,86	82,46	0,98	3,9
	2023	81,05...84,35	82,91	0,36	1,4
	среднее	82,19...84,57	83,14	0,23	1,0
Клетчатка	2022	0,72...2,14	1,26	0,17	43,4
	2023	0,66...1,20	0,93	0,07	23,5
	среднее	0,69...1,56	1,10	0,10	29,8

Сильная изменчивость выявлена по водному дефициту и площади листа, содержанию клетчатки и проламинов в белке зерна. Коэффициент вариации в среднем за 2022–2023 гг. составил 28,5–33,6%. По остальным признакам вариабельность средняя – от 10,4 до 16,8% (таблицы 1–3).

Корреляционный анализ выявил взаимосвязи между основными селекционными признаками. Однако проявление сопряженности признаков зависело от особенностей метеорологических условий, в которых проходила вегетация растений сорго (рисунок 2).

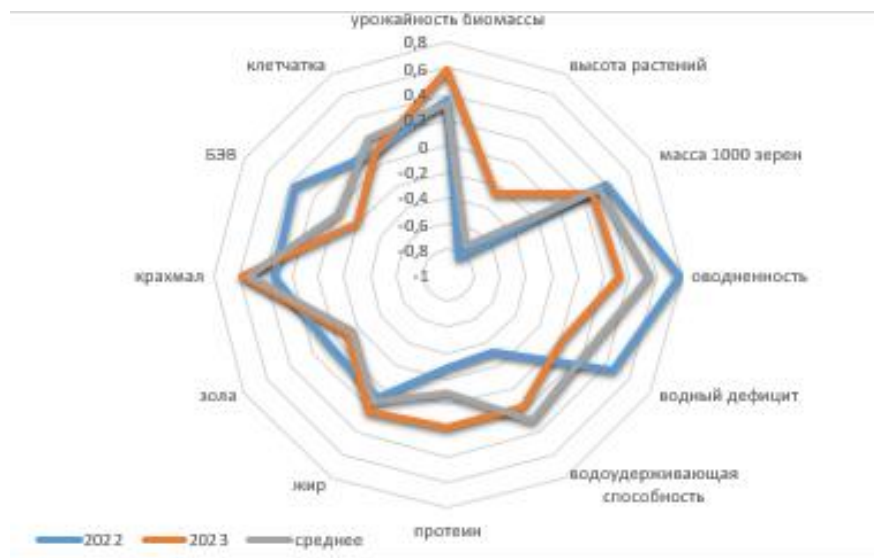


Рисунок 2. Сопряженность урожайности зерна с физиологическими, морфометрическими и биохимическими признаками у сорго, 2022–2023 гг.

Picture 2. Grain yield correlation of with physiological, morphometric and biochemical characteristics in sorghum, 2022–2023

Однако только повторяющиеся в различных условиях корреляции дают возможность селекционерам на ранних этапах селекционного процесса выделять и включать в гибридизацию новые образцы, достигая оптимального сочетания признаков планируемого сорта или гибрида. В среднем за период исследований урожайность зерна обратно коррелировала с высотой растений ($r = -0,73$), что подтверждалось и в условиях 2022 г. ($r = -0,85$). Тесная прямая взаимосвязь подтвердилась между параметрами наибольшего листа ($r = 0,88$), а обратная – между массой 1000 зерен и параметрами листа. Также выявлена тенденция средней взаимосвязи урожайности с содержанием крахмала в зерне: в 2022 г. коэффициент корреляции составил 0,33; в 2023 г. – 0,59 и в среднем – 0,53; с оводненностью тканей листьев: в 2022 г. коэффициент корреляции 0,79; в 2023 г. – 0,32 и в среднем 0,55. Причем в условиях 2022 г. зависимость урожайности от оводненности тканей листа была сильной и высокозначимой (таблица 4).

Таблица 4. Взаимосвязь комплекса селекционных признаков у образцов сорго, 2022–2023 гг.

Table 4. Relationship between the complex of breeding traits in sorghum samples, 2022–2023

Сравниваемые показатели	Коэффициент корреляции		
	2022 г.	2023 г.	среднее
Урожайность зерна – высота растений	-0,85**	-0,28	-0,73*
Оводненность – урожайность семян	0,79**	0,32	0,55

Продолжение таблицы 4

Водоудерживающая способность – длина листа	0,45	0,68*	0,72*
Водоудерживающая способность – площадь листа	0,72*	0,59	0,67*
Водоудерживающая способность – клетчатка	0,38	0,49	0,67*
Длина листа – площадь листа	0,87**	0,89**	0,88**
Длина листа – масса 1000 зерен	-0,80**	-0,68*	-0,80**
Площадь листа – масса 1000 зерен	-0,78**	-0,70*	-0,75**
Содержание белка – содержание БЭВ	-0,39	-0,90**	-0,90**
Содержание белка – содержание золы	-0,26	-0,79**	-0,67*
Содержание жира – содержание БЭВ	0,19	-0,91**	-0,74**
Содержание жира – содержание золы	-0,51	-0,79**	-0,84**
Содержание жира – содержание клетчатки	0,70*	0,80**	0,73*
Содержание золы – содержание БЭВ	0,01	0,80**	0,83**

Примечание: * $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$.

Кроме того, водоудерживающая способность наибольшего листа в фазу цветения отрицательно коррелирует с его длиной и площадью, а также с содержанием в зерне клетчатки ($r = -0,80 \dots -0,75$). Следует отметить, что у ряда культур (например, у пшеницы, риса, сорго) засухоустойчивость коррелировала с урожайностью [6] и содержанием в зерне белка [7–9]. Нами сопряженность этих признаков не выявлена, хотя сорта с высоким уровнем оводненности листьев характеризовались более высоким содержанием белка.

Накопление белка и жира в зерне сорго отрицательно коррелировало с содержанием безазотистых экстрактивных веществ и минеральными веществами, что подтверждается высокими коэффициентами корреляции – от $-0,90$ до $-0,67$. Причем увеличение белка при снижении количества БЭВ в зерне подтвердилось установленными нами ранее закономерностями [10]. Высокозначимой оказалась сопряженность следующих признаков: накопление жира с клетчаткой и содержание минеральных веществ и БЭВ ($r = 0,73-0,83$).

Выводы. Полученные данные свидетельствуют о том, что в засушливых регионах урожайность зерна сорго определяется способностью растений сохранять оводненность тканей листьев в стрессовых условиях. Установлено, что способность растений удерживать воду в тканях листьев взаимосвязана с длиной и площадью наибольшего листа, содержанием в зерне клетчатки ($r = 0,67-0,72$). При этом параметры наибольшего листа тесно отрицательно коррелировали с массой 1000 зерен ($r = -0,80 \dots -0,75$). Выявленные закономерности и взаимосвязи целесообразно учитывать в селекционной работе по выведению новых сортов и гибридов зернового сорго для возделывания в засушливых условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барановский, А.В., Косогова, Т.М., Садовой, А.С. Влияние погодных условий вегетационного периода на продуктивность зернового сорго // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. – 2020. – № 3 (55). – С. 8–16.
2. Movahedi, A. et al. (2023) 'Advanced Study of Drought-Responsive. Protein Pathways in Plants', *Agronomy*, vol. 13 (3), p. 849. <https://doi.org/10.3390/agronomy13030849>.
3. Chhikara, N. et al. (2019) 'Exploring the nutritional and phytochemical potential of sorghum in food processing for food security', *Nutrition & Food Science*, vol. 49 (2), pp. 318–332.
4. Оценка коллекционных образцов сорго зернового для селекции новых сортов / В. В. Ковтунов [и др.] // Зерновое хозяйство России. – 2022. – Т. 14. – № 4. – С. 46–51. – DOI: 10.31367/2079-8725-2022-82-4-46-51.

5. Tanwar, R. et al. (2023) ‘Nutritional, phytochemical and functional potential of sorghum: A review’, *Food Chemistry Advances*, vol. 3, p. e.100501.
6. Fardin, F. et al. (2023) ‘Nutritional value and agronomic traits of forage sorghum under drought stress’, *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, vol. 48, p. e102624. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2023.102624>.
7. Rakszegi, M. et al. (2019) ‘Drought stress affects the protein and dietary fiber content of wholemeal wheat flour in wheat *Aegilops* addition lines’, *PLoS One*, vol. 14 (2), p. e.0211892. DOI: 10.1371/journal.pone.0211892.
8. Nasrin, S. et al. (2020) ‘Impacts of drought stress on growth, protein, proline, pigment content and antioxidant enzyme activities in rice (*Oryza sativa* L. var BRRI dhan-24)’, *Dhaka University Journal of Biol. Sci.*, vol. 29 (1), pp. 117–123. DOI: 10.3329/dujbs.v29i1.46537.
9. Impa, S.M. et al. (2019) ‘Water deficit and heat stress induced alterations in grain physico-chemical characteristics and micronutrient composition in field grown grain sorghum’, *Cereal Sciences*, vol. 86, pp. 124–131.
10. Влияние метеорологических условий года на биохимический состав зерна сорго / В. В. Бычкова [и др.] // *Аграрная наука*. – 2023. – № 12. – С. 102–107. – DOI: 10.32634/0869-8155-2023-377-12-102-107.

REFERENCES

1. Baranovsky, A.V., Kosogova, T.M., Sadovoy, A.S. (2020), “The influence of weather conditions of the growing season on the productivity of grain sorghum”, *Vestnik of the Bashkir State Agrarian University*, no. 3(55), pp. 8–16. (In Russ.)
2. Movahedi, A. et al. (2023) ‘Advanced Study of Drought-Responsive. Protein Pathways in Plants’, *Agronomy*, vol. 13 (3), p. 849. <https://doi.org/10.3390/agronomy13030849>.
3. Chhikara, N. et al. (2019) ‘Exploring the nutritional and phytochemical potential of sorghum in food processing for food security’, *Nutrition & Food Science*, vol. 49 (2), pp. 318–332.
4. Оценка коллекционных образцов сорго зернового для селекции новых сортов / В. В. Ковтунов [и др.] // *Зерновое хозяйство России*. – 2022. – Т. 14. – № 4. – С. 46–51. – DOI: 10.31367/2079-8725-2022-82-4-46-51.
5. Tanwar, R. et al. (2023) ‘Nutritional, phytochemical and functional potential of sorghum: A review’, *Food Chemistry Advances*, vol. 3, p. e.100501.
6. Fardin, F. et al. (2023) ‘Nutritional value and agronomic traits of forage sorghum under drought stress’, *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, vol. 48, p. e102624. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2023.102624>.
7. Rakszegi, M. et al. (2019) ‘Drought stress affects the protein and dietary fiber content of wholemeal wheat flour in wheat *Aegilops* addition lines’, *PLoS One*, vol. 14 (2), p. e.0211892. DOI: 10.1371/journal.pone.0211892.
8. Nasrin, S. et al. (2020) ‘Impacts of drought stress on growth, protein, proline, pigment content and antioxidant enzyme activities in rice (*Oryza sativa* L. var BRRI dhan-24)’, *Dhaka University Journal of Biol. Sci.*, vol. 29 (1), pp. 117–123. DOI: 10.3329/dujbs.v29i1.46537.
9. Impa, S.M. et al. (2019) ‘Water deficit and heat stress induced alterations in grain physico-chemical characteristics and micronutrient composition in field grown grain sorghum’, *Cereal Sciences*, vol. 86, pp. 124–131.
10. Bychkova, V.V. et al. (2023), “Influence of meteorological conditions of the year on the biochemical composition of sorghum grain”, *Agr. Science*, no. 12, pp. 102–107. (In Russ.) DOI: 10.32634/0869-8155-2023-377-12-102-107.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Оксана Павловна Кибальник, кандидат биологических наук, главный научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научно-исследовательский и проектно-технологический институт сорго и кукурузы», г. Саратов, Россия; <https://orcid.org/0000-0002-1808-8974>, SPIN-код: 9632-2976; Autor ID: 50108046; e-mail: kibalnik79@yandex.ru.

Вера Валерьевна Бычкова, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научно-исследовательский и проектно-технологический институт сорго и кукурузы», г. Саратов, Россия; <https://orcid.org/0000-0002-0288-663X>, SPIN-код: 2235-0707; Autor ID: 65581365; e-mail: bychkova_vv@list.ru.

Анна Викторовна Ерохина, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научно-исследовательский и проектно-технологический институт сорго и кукурузы», г. Саратов, Россия; <https://orcid.org/0000-0002-5874-1931>, SPIN-код: 2593-6120; Autor ID: 843401; e-mail: eroha46@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Oksana P. Kibalnik, Cand. Sci. (Biol.), Chief Researcher, Federal State Budgetary Scientific Institution "Russian Research and Design–Technological Institute of Sorghum and Corn", Saratov, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-1808-8974>, SPIN-code: 9632-2976; Autor ID: 50108046; e-mail: kibalnik79@yandex.ru.

Vera V. Bychkova, Cand. Sci. (Biol.), Leading Researcher, Federal State Budgetary Scientific Institution "Russian Research and Design–Technological Institute of Sorghum and Corn ", Saratov, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-0288-663X>, SPIN-code: 2235-0707; Autor ID: 65581365; e-mail: bychkova_vv@list.ru.

Anna V. Erokhina, Senior Researcher, Federal State Budgetary Scientific Institution "Russian Research and Design–Technological Institute of Sorghum and Corn", Saratov, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-5874-1931>, SPIN-code: 2593-6120; Autor ID: 843401; e-mail: eroha46@mail.ru.

Авторский вклад. Все авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении и анализе данного исследования. Все авторы настоящей статьи ознакомились и одобрили представленный окончательный вариант.

Author's contribution. All authors of this research paper have directly participated in the planning, execution, or analysis of this study. All authors of this paper have read and approved the final version submitted.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Received 27.05.2024
Поступила после рецензирования / Revised 29.07.2024
Принята к публикации / Accepted 20.08.2024





Научная статья/ Original article

УДК 631.8: 632.4

Код ВАК: 4.1.1


DOI: 10.24411/2078-1318-2024-3-45-59

ВЛИЯНИЕ АССОЦИАТИВНЫХ РИЗОБАКТЕРИЙ НА ФОРМИРОВАНИЕ ПРОДУКТИВНОСТИ МЯГКОЙ ПШЕНИЦЫ В УСЛОВИЯХ ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

Л.Е. Колесников¹  , Б.А.Х. Хассан² , А.А. Белимов³ 

¹Санкт-Петербургский государственный аграрный университет

г. Пушкин, г. Санкт-Петербург, Россия

 kleon9@yandex.ru

²Ministry of Agriculture, Agricultural Research Office,

г. Багдад, Ирак

³Всероссийский Научно-исследовательский

Институт сельскохозяйственной микробиологии

г. Пушкин, г. Санкт-Петербург, Россия

Реферат. В последнее время значительное внимание уделяется повышению продуктивности зерновых культур с использованием экологически чистых технологий их возделывания. При этом в качестве альтернативы минеральным удобрениям, химическим средствам защиты и регуляции роста растений перспективно применение полифункциональных биопрепаратов на основе микроорганизмов из группы PGPR (ризобактерий). Такой подход особенно важен на фоне увеличивающегося загрязнения экосистем занесенными извне чужеродными химическими веществами (ксенобиотиками), которые негативно влияют на окружающую среду. Использование ризобактерий в технологиях возделывания пшеницы позволит повысить конкурентоспособность получаемого зерна, уровень его токсикологической безопасности и привлекательности для потребителя. Цель наших исследований заключается в биологическом обосновании использования 3 штаммов ассоциативных ризобактерий: *Bacillus subtilis* 124-11; *Sphingomonas* sp. K1B; *Pseudomonas fluorescens* SPB2137 при возделывании мягкой пшеницы. Схема полевого опыта включала инокуляцию бактериальными штаммами семян перед посевом и двукратное внекорневое опрыскивание ими растений в период вегетации. Было установлено, что за период 2019, 2021, 2022 гг. выраженным ростостимулирующим и защитным действием отличался штамм *Bacillus subtilis* 124-11. Преобладание защитных свойств в отношении комплекса особо опасных болезней пшеницы отмечено у штамма *Sphingomonas* sp. K1B. При применении штамма *Pseudomonas fluorescens* SPB2137 зарегистрированы максимальные значения роста важнейших показателей, характеризующих структуру колоса пшеницы – числа и массы зерен в колоске колоса. Таким образом, применение указанных бактериальных штаммов не только приводило к существенному повышению продуктивности сортов мягкой пшеницы Сударыня, к-66407 и Trizo, к-64981, но и оптимизировало фитосанитарное состояние ее посевов.

Ключевые слова: мягкая пшеница, ассоциативные ризобактерии, фитометрические показатели, продуктивность пшеницы, корневая гниль, болезни пшеницы

Для цитирования: Колесников Л.Е., Хассан Б.А.Х., Белимов А.А. Влияние ассоциативных ризобактерий на формирование продуктивности мягкой пшеницы в условиях Ленинградской области // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2024. – № 3 (77). – С. 45–59. – DOI: 10.24411/2078-1318-2024-3-45-59.

Благодарности. Подготовка рукописи статьи выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 24-16-00166).

INFLUENCE OF ASSOCIATIVE RHIZOBACTERIA
ON FORMING OF SOFT WHEAT PRODUCTIVITY UNDER CONDITIONS
OF LENINGRAD REGIONL.E. Kolesnikov¹  , B.A.H. Hassan² , A.A. Belimov³ ¹Saint-Petersburg State Agrarian University,
Pushkin, St. Petersburg, Russia
kleon9@yandex.ru²Ministry of Agriculture, Agricultural Research Office,
Abo-Ghraib, Baghdad, Iraq³All-Russia Research Institute for Agricultural Microbiology
Pushkin, St. Petersburg, Russia

Abstract. Recently, considerable attention has been paid for increasing the productivity of grain crops using environmentally friendly technologies for their cultivation. The use of polyfunctional biopreparations based on microorganisms from the PGPR (rhizobacteria) group is promising as an alternative to mineral fertilisers, chemical means of plant protection and growth regulation. This approach is especially important against the background of increasing pollution of ecosystems by toxic chemicals (xenobiotics) negatively affecting the environment. Application of rhizobacteria in wheat cultivation technologies will help to increase the competitiveness of the resulting grain, increase the level of its toxicological safety and attractiveness for consumers. The purpose of our research is to apply three strains of associative plant growth-promoting rhizobacteria: *Bacillus subtilis* 124-11; *Sphingomonas* sp. K1B; *Pseudomonas fluorescens* SPB2137 in soft wheat cultivars Sudarynya (k-66407) and Trizo (k-64981) cultivation. The scheme of field experiment included inoculation with bacterial strains of seeds before sowing, and double foliar spraying of plants during the growing season. It was found that *Bacillus subtilis* strain 124-11 had a pronounced growth-stimulating and protective effect in 2019, 2021-2022. The predominance of protective properties against a complex of particularly dangerous wheat diseases was noted for *Sphingomonas* sp. K1B. When using *P. fluorescens* SPB2137, maximum values of the most important indicators characterizing wheat ear structure, number and weight of grains in spikelet of spikes were recorded. Thus, using these bacterial strains not only led to a significant increase in the productivity of soft wheat, but also optimized the phytosanitary condition of plants.

Keywords: soft wheat, associative rhizobacteria, phytometric indicators, wheat productivity, root rot, wheat diseases

For citation: Kolesnikov, L.E., Hassan, B.A.H. and Belimov, A.A. (2024) 'Influence of associative rhizobacteria on forming of soft wheat productivity under conditions of Leningrad Region', *Izvestiya of Saint-Petersburg State Agrarian University*, vol. 77, no. 3, pp. 45–59. (In Russ.) DOI: 10.24411/2078-1318-2024-3-45-59.

Acknowledgments. The manuscript was prepared with the support of the Russian Science Foundation (project No. 24-16-00166).

Введение. Производство зерновых культур в РФ имеет стратегическое значение для обеспечения продовольственной безопасности (Лачуга Ю.Ф., 2017; Данилова Т.А. и др., 2020). Особое внимание уделяется разработкам ресурсосберегающих технологий их возделывания, в т. ч. с использованием полифункциональных биопрепаратов (Павлюшин В.А. и др., 2022; Шапошников А.И. и др., 2023).

Стимулирующее действие бактерий из группы PGPB (*Plant Growth Promoting Bacteria* – PGPB) обусловлено продуцированием ими фитогормонов, повышением доступности питательных веществ для растений и биоконтрольной функцией в отношении фитопатогенных микромицетов (Asaf S. и др., 2017). Ассортимент и интенсивность синтеза фитогормонов, обнаруженных у ризобактерий, различен. Так, ауксины были обнаружены у *Pseudomonas*, у нескольких видов *Bacillus* (Idris E.S.E. et al., 2007), *Sphingomonas* sp. (Khan A.L. et al., 2014), цитокинины – у *Pseudomonas* (Großkinsky D.K. et al., 2016) и *Bacillus subtilis* (Kudoyarova G.R. et al., 2014), гибберелины – у *Bacillus* sp. (Shahzad R. et al., 2016), абсцизовая кислота – у *Sphingomonas* sp. (Khan A.L. et al., 2014), салициловая кислота – у *Pseudomonas aeruginosa* (De Meyer G. et al., 1999).

Антагонистическая активность ризобактерий обусловлена синтезом антибиотиков, литических ферментов, сидерофоров и т. д. (Максимов И.В. и др., 2011), а также вторичных метаболитов, которые могут быть образованы ризобактериями при изменении условий среды, в частности, при повышенной конкуренции за субстрат, недостаточной концентрации основных питательных элементов или макро- и микроэлементов, при наличии нетипичного источника питания или макроэлементов (Штарк О.Ю. и др., 2003, Балабан Н.П. и др., 2003).

Вышеизложенное свидетельствует об актуальности исследований по оценке эффективности применения ризобактерий при возделывании зерновых культур и, в частности пшеницы, для улучшения роста, развития растений и повышения их устойчивости к факторам внешней среды.

Цель исследования – оценить влияние ассоциативных ризобактерий на продуктивность и интенсивность развития особо опасных возбудителей болезней мягкой пшеницы в условиях Ленинградской области.

Материалы, объекты и методы исследования. Полевой эксперимент по изучению действия штаммов ассоциативных ризобактерий на формирование продуктивности мягкой пшеницы был выполнен на полях научно-производственной базы «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР» ФГБНУ «ФИЦ Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова» (ВИР).

Объект исследования – сорта мягкой пшеницы яровой (*Triticum aestivum* L.): Сударыня, к-66407 и Trizo, к-64981 из отдела генетических ресурсов пшениц ВИР; особо опасные болезни пшеницы: бурая (*Puccinia triticina* Erikss.) и желтая ржавчина (*Puccinia striiformis* West.), мучнистая роса (*Blumeria graminis* (DC.) Speer f. sp. *tritici* Marchal.), гельминтоспориозная корневая гниль (*Bipolaris sorokiniana* (Sacc.) Shoemaker).

Предмет исследования – штаммы ассоциативных ризобактерий *Bacillus subtilis* 124-11, *Sphingomonas* sp. K1B, *Pseudomonas fluorescens* SPB2137 из Ведомственной коллекции полезных микроорганизмов сельскохозяйственного назначения при ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной микробиологии» (ФГБНУ ВНИИСХМ).

Микрополевые опыты были заложены в четырехкратной повторности методом организованных повторений. Площадь учетной делянки для одного варианта опыта составила 1,0 м², варианты по делянкам в повторениях расположены систематически.

Схема опыта при анализе эффективности штаммов ассоциативных ризобактерий в процессе возделывания мягкой пшеницы включала следующие варианты:

1. Контроль (без обработки).

2. *Bacillus subtilis* 124-11 (инокуляция семян и опрыскивание растений культуральной жидкостью бактерий).

3. *Pseudomonas fluorescens* SPB2137 (инокуляция семян и опрыскивание растений культуральной жидкостью бактерий).

4. *Sphingomonas* sp. K1B (инокуляция семян и опрыскивание растений культуральной жидкостью бактерий).

В фазы выхода в трубку и начала цветения осуществлено двукратное опрыскивание растений культуральной жидкостью бактерий. При инокуляции семян норма расхода рабочей жидкости (10^9 кл/мл) – 2 мл суспензии на 10 г семян, при внекорневом опрыскивании растений – 100 мл/м².

В фазу развития зародышевого побега осуществляли оценку влияния штаммов ассоциативных ризобактерий на общепринятый показатель – полевую всхожесть (%). В фазы колошения-цветения исследовали комплекс показателей растений: продуктивную и общую кустистость (шт.), фазу растений (балл, по шкале Цадокса (Эукарпия), площадь флагового и предфлагового листа (см²), высоту растений (см), длину колоса (см), число колосков в колосе (шт.), массу колоса (г.). Кроме того, определяли число и длину первичных корней (главного зародышевого корня, зародышевых и колеоптильных корней), отходящих от эпикотилия. Осуществляли учет числа и длины узловых корней пшеницы. Рассчитывали показатели массы корней и вегетативной части растений. В фазу созревания (Ф91, стадия полной спелости) изучали структуру урожайности пшеницы по следующим показателям: число колосков в колосе, шт.; длина колоса, см; масса колоса с зерном; число зерен в колосе, шт.; масса зерен с колоса; масса 1000 зерен. Продуктивность единичного растения пшеницы рассчитывали в соответствии с данными о его продуктивной кустистости и массе зерен колоса. Урожайность сортов пшеницы применительно к площади посева (т/га) определяли по продуктивной кустистости, массе зерен колоса и числу растений, высеянных на 1 м². Учет интенсивности развития возбудителей корневой гнили и болезней листьев пшеницы был приурочен к основным фазам онтогенеза пшеницы. Пораженность пшеницы болезнями оценивали по комплексу общепринятых и расчетных фитопатологических показателей (Колесников и др., 2023).

Результаты исследований. Как следует из данных рисунков 1 и 2, в 2019 г. максимальные величины продуктивности одного растения Y_p и урожайности пшеницы Y_n зарегистрированы в вариантах опыта со штаммами *Bacillus subtilis* 124-11 (сорт Сударыня: $Y_p = 3,82 \pm 0,24$ г/растение и $Y_n = 5,59 \pm 0,38$ т/га), *Pseudomonas fluorescens* SPB2137 (Trizo: $Y_p = 3,14 \pm 0,23$ г/растение и $Y_n = 4,71 \pm 0,35$ т/га). Изменение указанных показателей по сравнению с контролем составило 50,3%; 46,6% и 5,4%; 10,9%, соответственно.

В 2021 г. определен значительный рост продуктивности и урожайности сорта Trizo – на 368,6% в вариантах опыта «*Bacillus subtilis* 124-11» ($Y_p = 1,86 \pm 0,09$ г/растение и $Y_n = 3,73 \pm 0,18$ т/га) и «*Sphingomonas* sp. K1B» ($Y_p = 1,08 \pm 0,09$ г/растение и $Y_n = 2,15 \pm 0,18$ т/га) по сравнению с контролем ($Y_p = 0,4 \pm 0,08$ г/растение и $Y_n = 0,80 \pm 0,16$ т/га). Однако в сравнении с 2019 г. и 2022 г. в 2021 г. указанные изменения при применении штаммов ассоциативных бактерий не были сильно выражены в связи с крайне низкими значениями урожайности пшеницы в контроле.

В 2022 г. все бактериальные штаммы оказали статистически достоверное влияние на рост продуктивности и урожайности сортов Сударыня и Trizo. Максимальную эффективность

проявил штамм *Sphingomonas* sp. K1B, применение которого, в частности на сорте Trizo, обуславливало рост указанных показателей с $Y_p = 0,44 \pm 0,05$ г/растение и $Y_{II} = 0,33 \pm 0,04$ т/га – в контроле до $Y_p = 4,90 \pm 0,29$ г/растение и $Y_{II} = 8,33 \pm 0,49$ т/га в варианте опыта.

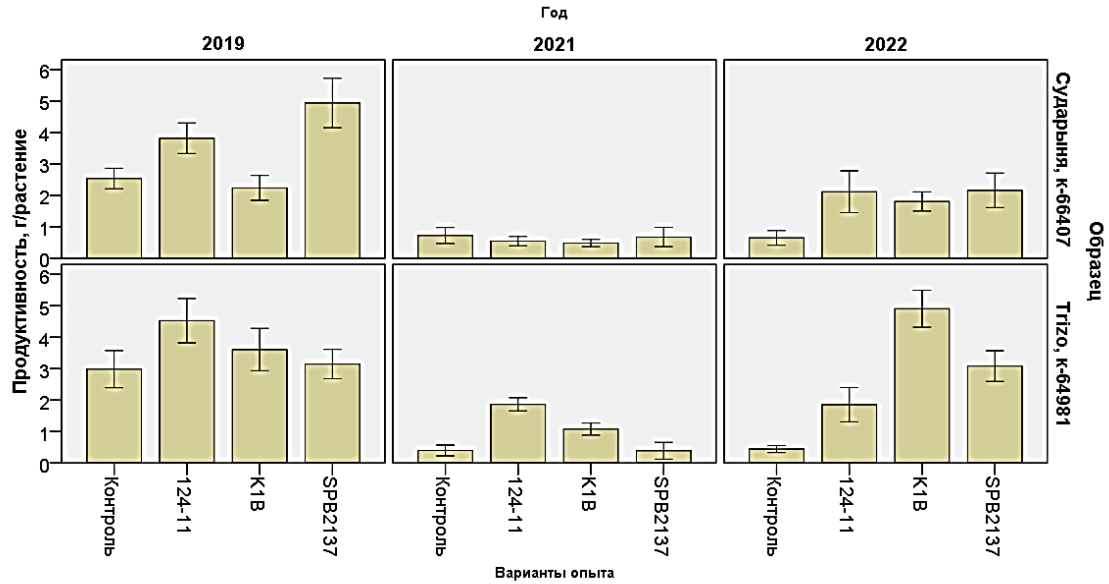


Рисунок 1. Варьирование продуктивности сортов Сударыня и Trizo при применении штаммов ассоциативных ризобактерий. 2019, 2021, 2022 гг.

Figure 1. Variation in productivity of Sudarynya and Trizo cultivars when using strains of associative rhizobacteria. 2019, 2021, 2022

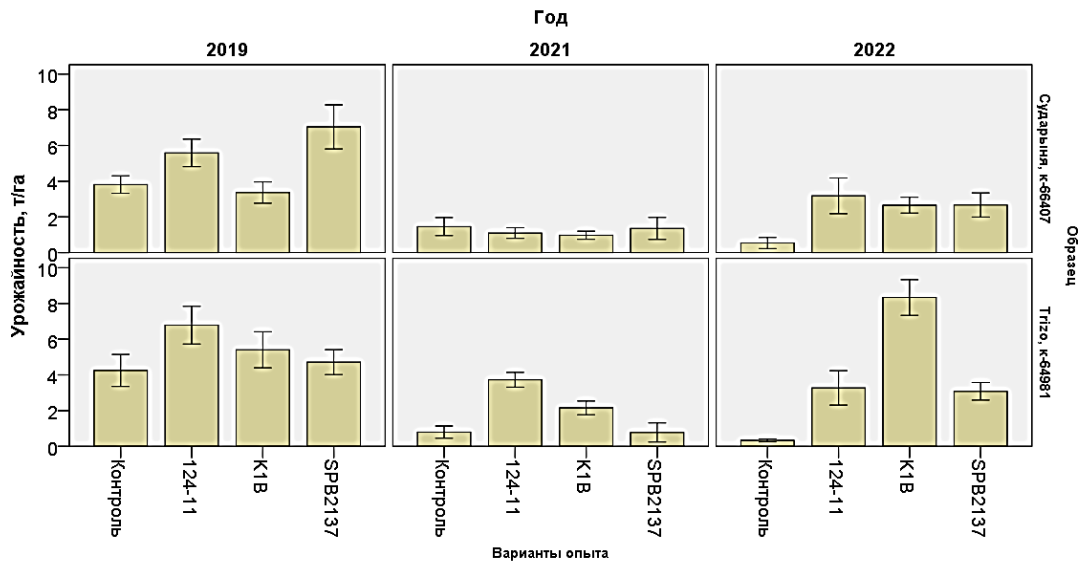


Рисунок 2. Варьирование урожайности сортов Сударыня и Trizo при применении штаммов ассоциативных ризобактерий. 2019, 2021, 2022 гг.

Figure 2. Yield variation of Sudarynya and Trizo cultivars when using strains of associative rhizobacteria. 2019, 2021, 2022

В среднем по двум сортам (рис. 3 и 4) максимальные величины продуктивности ($Y_p = 4,18 \pm 0,21$ г/растение) и урожайности ($Y_n = 6,19 \pm 0,33$ т/га) пшеницы выявлены в 2019 г. в варианте опыта, где был использован штамм *Bacillus subtilis* 124-11, что было существенно больше – на 50,7% и 52,9% по сравнению с контролем ($Y_p = 2,77 \pm 0,17$ г/растение; $Y_n = 4,04 \pm 0,26$ т/га). Кроме того, в данном году был отмечен значительный рост вышеуказанных показателей в варианте опыта, где был использован штамм бактерии «*Pseudomonas fluorescens* SPB2137» – на 45,1% ($Y_p = 4,02 \pm 0,24$ г/растение) и 45,3% ($Y_n = 5,88 \pm 0,37$ т/га), соответственно.

В 2021 г. эффективность бактериальных штаммов в отношении продуктивности и урожайности пшеницы была значительно ниже, чем в 2019 и 2022 гг. Однако в варианте опыта «*Bacillus subtilis* 124-11» в 2021 г. выявлен статистически достоверный рост показателей по сравнению с контролем ($Y_p = 0,59 \pm 0,08$ г/растение; $Y_n = 1,18 \pm 0,16$ т/га) – на 86,0% ($Y_p = 1,10 \pm 0,16$ г/растение; $Y_n = 2,20 \pm 0,32$ т/га).

В 2022 г. все вышеперечисленные бактериальные штаммы оказали существенное влияние на продуктивность и урожайность мягкой пшеницы, но наибольшие величины показателей были выявлены в варианте опыта «*Sphingomonas* sp. K1B» ($Y_p = 3,54 \pm 0,28$ г/растение; $Y_n = 5,84 \pm 0,49$ т/га).

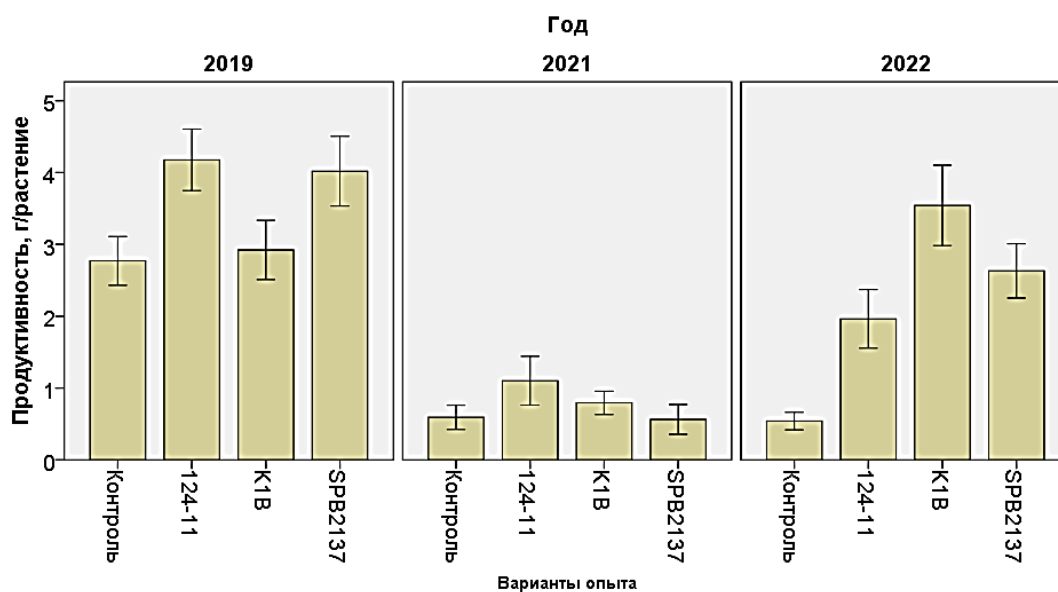


Рисунок 3. Динамика продуктивности мягкой пшеницы при применении штаммов ассоциативных ризобактерий. 2019, 2021, 2022 гг.

Figure 3. Dynamics of soft wheat productivity when using strains of associative rhizobacteria. 2019, 2021, 2022

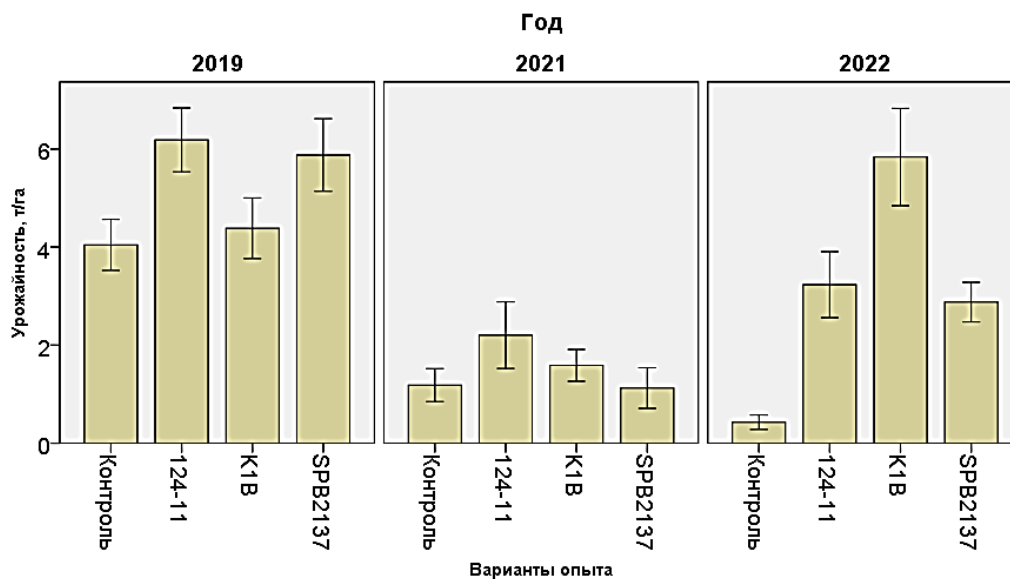


Рисунок 4. Динамика урожайности мягкой пшеницы при применении штаммов ассоциативных ризобактерий. 2019, 2021, 2022 гг.

Figure 4. Yield dynamics of soft wheat when using strains of associative rhizobacteria. 2019, 2021, 2022

Высокие значения урожайности и продуктивности пшеницы в 2019 г. по сравнению с 2021 г. и 2022 г., возможно, были связаны с более благоприятными метеорологическими условиями роста и развития пшеницы в этом году (гидротермический коэффициент $ГТК_{июль} = 0,98$; $ГТК_{август} = 0,92$; сумма температур в мае выше $10^{\circ}C$ со дня посева $11 мая T_{май} = 228,12^{\circ}C$, сумма осадков в мае со дня посева $W_{май} = 72,0$ мм; сумма температур в июне $T_{июнь} = 529,7^{\circ}C$; сумма осадков в июне $W_{июнь} = 33,9$ мм; сумма температур в июле $T_{июль} = 479,7^{\circ}C$; сумма осадков в июле $W_{июль} = 58,0$ мм; сумма температур в августе $T_{август} = 478,0^{\circ}C$; сумма осадков в августе $W_{август} = 24,9$ мм). Кроме того, в данном году отмечена минимальная активность Солнца: число пятен на Солнце в среднем за год $N_{г.п.} = 3,6$; число пятен на Солнце в июле $N_{июль.п.} = 0,9$; число Вольфа в июле $V_{июль} = 0,7$).

Минимальные значения урожайности и продуктивности пшеницы в 2021 г. были связаны с жарким и засушливым вегетационным периодом возделывания пшеницы. Были зарегистрированы высокие значения температуры в мае $T_{май} = 289,1^{\circ}C$, июне $T_{июнь} = 590,4^{\circ}C$, июле $T_{июль} = 837,7^{\circ}C$. При этом в июне и июле выпало очень незначительное количество осадков: $W_{июнь} = 10,7$ мм, $W_{июль} = 5,7$ мм, а в августе, наоборот, сумма осадков составила $W_{август} = 122,5$ мм. Активность Солнца в 2021 г. резко возросла по сравнению с 2019 г.: $N_{г.п.} = 29,6$; $N_{июль.п.} = 34,3$; $V_{июль} = 35,9$. Значения ГТК: в июле – $1,95$, в августе – $2,58$.

Метеорологические условия вегетационного периода роста и развития пшеницы в 2022 г. отличались минимальной суммой осадков в мае $W_{май} = 4,3$ мм и максимальной – в августе $W_{май} = 544,9$ мм. Значения ГТК в июле – $1,20$, в августе – $2,54$. Активность Солнца была максимальной: $N_{г.п.} = 83,1$; $N_{июль.п.} = 91,4$; $V_{июль} = 110$.

В среднем по сортам и годам исследования (рисунки 5 и 6) все штаммы ассоциативных ризобактерий оказали существенное влияние на урожайность и продуктивность мягкой пшеницы. Однако наибольшее изменение продуктивности (на $83,1\%$) и урожайности (на $95,2\%$) мягкой пшеницы по сравнению с контролем выявлено в варианте опыта с использованием штамма *Bacillus subtilis* 124-11.

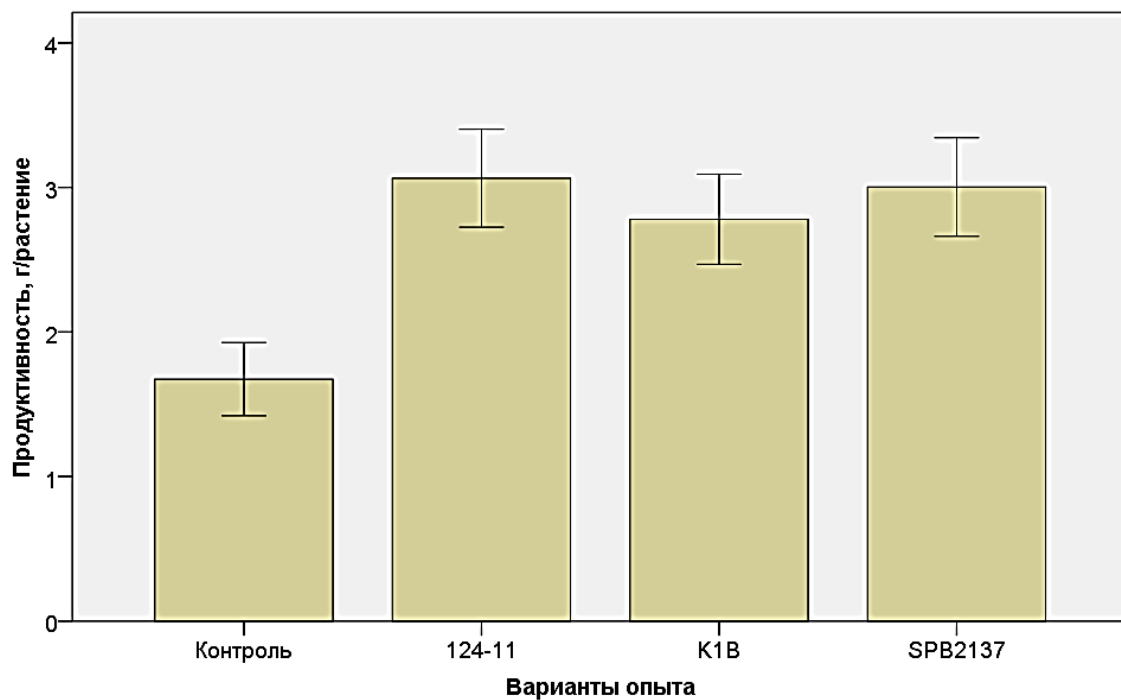


Рисунок 5. Продуктивность мягкой пшеницы при применении штаммов ассоциативных бактерий в среднем по двум сортам (Сударыня и Trizo). 2019, 2021, 2022 гг.

Figure 5. Soft wheat productivity when using strains of associative bacteria on average for two cultivars (Sudarynya and Trizo). 2019, 2021, 2022

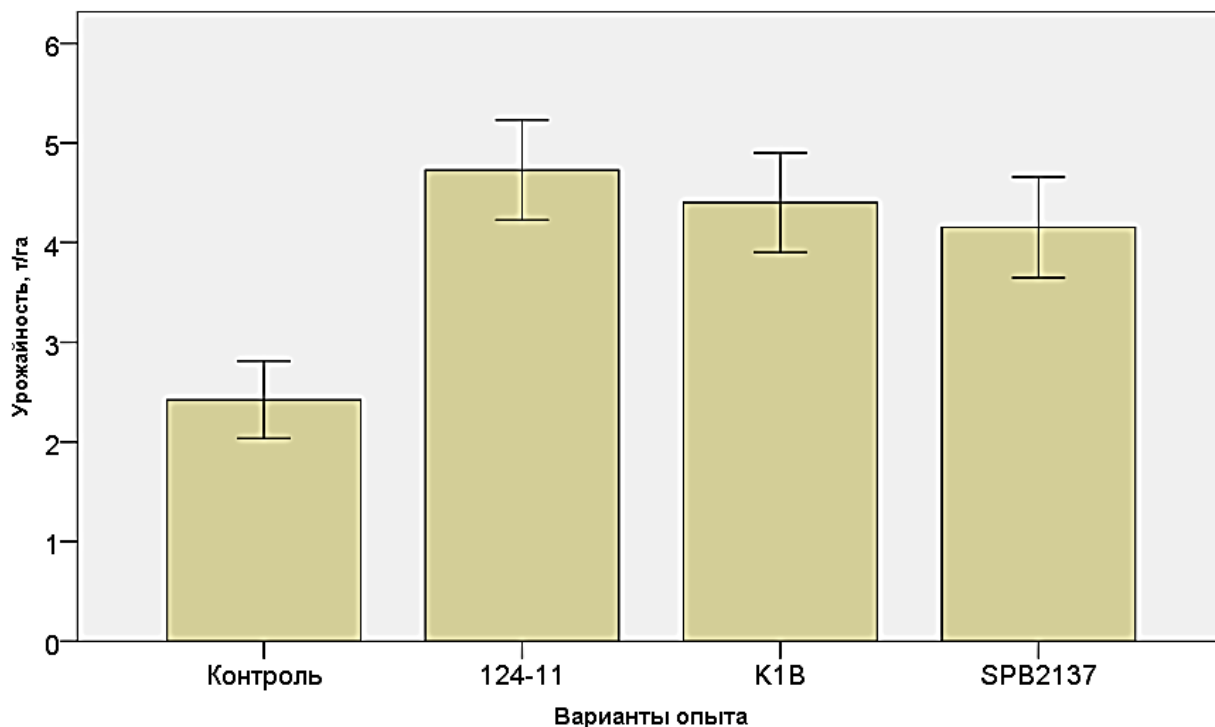


Рисунок 6. Урожайность мягкой пшеницы при применении штаммов ассоциативных бактерий в среднем по двум сортам (Сударыня и Trizo). 2019, 2021, 2022 гг.

Figure 6. Soft wheat yield when using strains of associative bacteria on average for two cultivars (Sudarynya and Trizo). 2019, 2021–2022

Многофакторный подход к анализу комплекса из 21-го показателя, характеризующего фитометрические параметры посевов и структуру урожайности мягкой пшеницы, позволил определить тенденции в их изменении и выявить относительное число параметров, величины которых отличались достоверно большими значениями при применении штаммов ассоциативных ризобактерий по сравнению с контролем (таблицы 1 и 2).

Как следует из данных рисунка 7, за период 2019, 2021, 2022 гг. наибольшее число фитометрических показателей, значения которых статистически достоверно выросли по сравнению с контролем при $P < 0,05$, было выявлено у сорта Сударыня в варианте опыта со штаммом *Bacillus subtilis* 124-11 – 52,4%; у сорта Trizo – в вариантах «*Bacillus subtilis* 124-11» (66,7%) и «*Sphingomonas* sp. K1B» (66,7%), а в среднем по двум сортам – при использовании штамма «*Bacillus subtilis* 124-11» (81,0%).

Таблица 1. Некоторые фитометрические показатели посевов сортов мягкой пшеницы Сударыня и Trizo при применении штаммов ассоциативных ризобактерий (2019, 2021, 2022 гг.)

Table 1. Some photometric indicators of soft wheat cultivars Sudarynya and Trizo when using strains of associative rhizobacteria (2019, 2021, 2022)

Вариант	Высота растения, см	Число первич. корней, шт.	Длина первич. корней, мм	Число узловых корней, шт.	Длина узловых корней, мм	Масса корней, г	Прод. куст., шт.	S флаг – листа см ²
Контроль	52,9	5,5	63,4	17,4	52,6	1,4	1,4	4,0
	1,6	0,3	2,5	1,0	1,5	0,1	0,1	0,3
<i>Bacillus subtilis</i> 124-11	58,1*	7,5	87,1	20,3	74,0	1,9	2,0	4,1
	1,3	0,5	3,0	1,1	1,6	0,2	0,1	0,2
<i>Sphingomonas</i> sp. K1B	57,7	6,7	80,2	19,4	64,7	1,7	2,5	4,1
	1,4	0,3	2,3	0,9	1,7	0,1	0,1	0,2
<i>Pseudomonas fluorescens</i> SPB2137	57,9	6,3	80,1	18,6	62,0	1,5	2,1	4,1
	1,3	0,4	2,8	1,1	1,5	0,1	0,1	0,2

* – различия с контролем достоверны при $P < 0,05$.

Таблица 2. Показатели структуры урожайности сортов мягкой пшеницы Сударыня и Trizo при применении штаммов ассоциативных ризобактерий (2019, 2021, 2022 гг.)

Table 2. Yield structure indicators of soft wheat cultivars Sudarynya and Trizo when using strains of associative rhizobacteria (2019, 2021, 2022)

Вариант	Длина колоса, мм	Число колосков в колосе, шт.	Масса колоса, г	Масса зерен одного колоса, г	Число зерен в колосе, шт.	Масса 1000 зерен, г	Число зерен в колоске колоса, шт.	Масса зерен в колоске колоса, г
Контроль	84,0 ±1,4	14,0 ±0,3	1,6 ±0,1	1,2 ±0,1	32,4 ±1,4	33,5 ±1,2	2,0 ±0,1	0,1 ±0,0

<i>Bacillus subtilis</i> 124-11	85,0 ±1,1	14,8 ±0,2	1,9 ±0,1	1,5 ±0,1	37,4 ±1,2	37,9 ±0,8	2,4 ±0,1	0,1 ±0,0
<i>Sphingomonas</i> sp. K1B	86,0 ±1,2	14,7 ±0,2	1,8 ±0,1	1,4 ±0,1	34,5 ±1,0	37,2 ±0,8	2,3 ±0,0	0,1 ±0,0
<i>Pseudomonas fluorescens</i> SPB2137	83,1 ±1,2	14,6 ±0,2	1,8 ±0,1	1,4 ±0,1	35,7 ±1,2	36,7 ±1,0	2,5 ±0,0	0,1 ±0,0

* – различия с контролем достоверны при $P < 0,05$.

В среднем за период 2019, 2021, 2022 гг. применение штамма *Bacillus subtilis* 124-11 на сортах Сударыня и Trizo обуславливало увеличение значений следующих показателей: полевой всхожести (23,6%), фазы онтогенеза (9,3%), высоты растений (10,0%), числа (36,0%), длины (37,4%) первичных корней, числа (16,8%) и длины (40,8%) узловых корней, массы корней (39,8%), продуктивной кустистости (41,4%), площади предфлагового листа (18,3%), числа колосков в колосе (5,2%), массы колоса (18,6%), числа зерен в колосе (15,5%), массы зерен одного колоса (21,2%), массы 1000 зерен (13,0%), числа (18,0%) и массы зерен (87,0%) в колоске колоса.

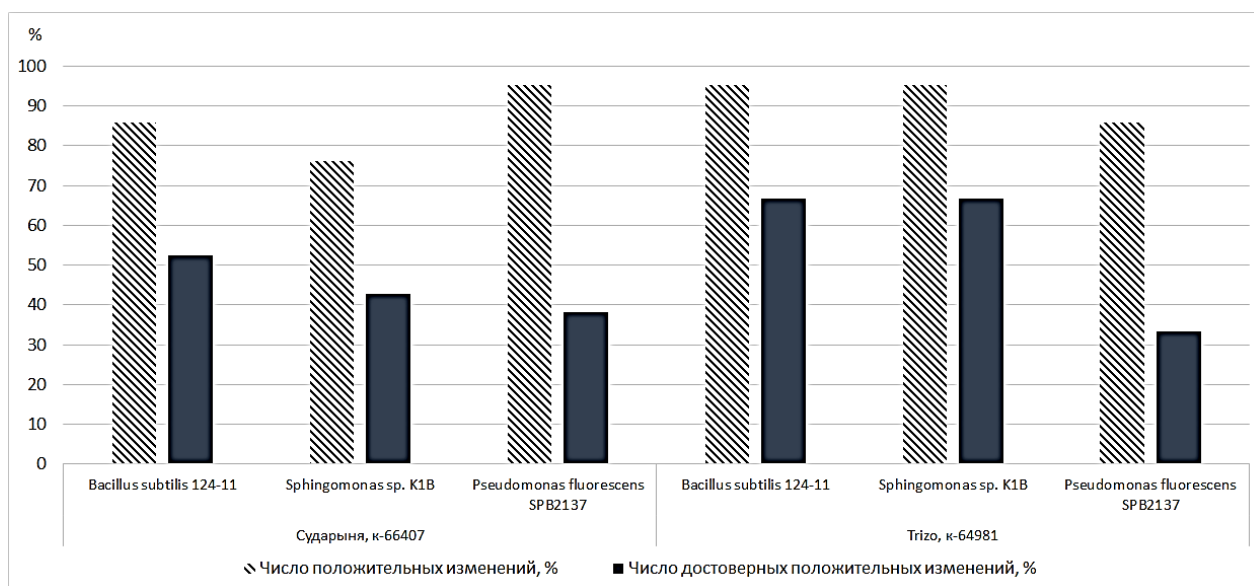


Рисунок 7. Относительное число фитометрических показателей посевов мягкой пшеницы, значения которых выросли и достоверно выросли ($P < 0,05$) при применении штаммов ассоциативных ризобактерий. 2019, 2021, 2022 гг.

Figure 7. Relative number of phytometric indicators of soft wheat crops, the values of which increased and significantly increased ($P < 0.05$) when using strains of associative rhizobacteria. 2019, 2021, 2022

Наибольшее снижение развития особо опасных болезней мягкой пшеницы ($P < 0,05$), в среднем по сортам Сударыня и Trizo (2019, 2021, 2022 гг.), было выявлено при применении штамма *Sphingomonas* sp. K1B (рисунки 8 и 9). При этом наблюдалось замедление развития корневой гнили (19,1%), развития мучнистой росы (5,6%), числа пятен с налетом мучнистой росы (51,5%), развития желтой ржавчины (6,8%), числа полос с пустулами желтой ржавчины (34,4%), числа пустул в полосе желтой ржавчины (32,1%).



Рисунок 8. Относительное число фитопатологических показателей развития особо опасных болезней мягкой пшеницы сорта Сударыня, значения которых выросли и достоверно выросли ($P < 0,05$) при применении штаммов ассоциативных ризобактерий. 2019, 2021, 2022 гг.

Figure 8. Relative number of phytopathological indicators of development of particularly dangerous diseases of soft wheat of the Sudarynya cultivar, the values of which increased and significantly increased ($P < 0.05$) when using strains of associative rhizobacteria. 2019, 2021, 2022

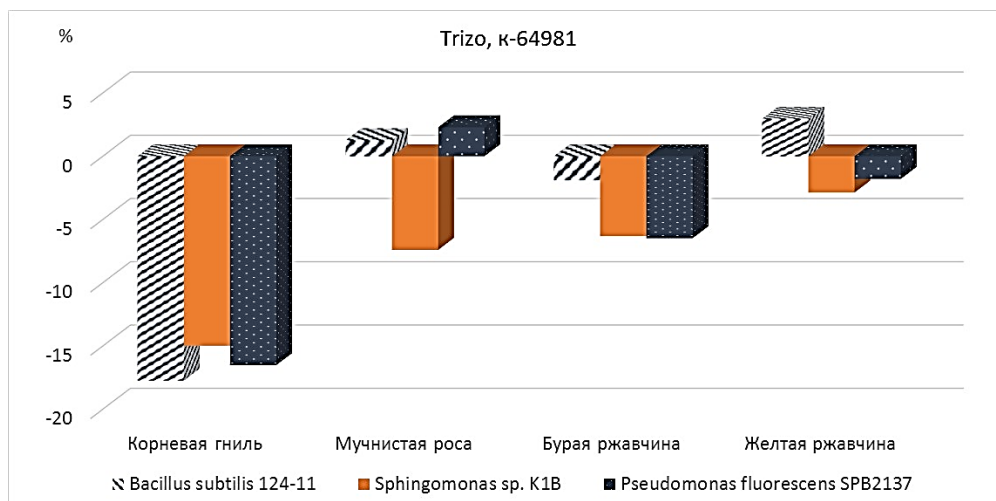


Рисунок 9. Относительное число фитопатологических показателей развития особо опасных болезней мягкой пшеницы сорта Trizo, значения которых выросли и достоверно выросли ($P < 0,05$) при применении штаммов ассоциативных ризобактерий. 2019, 2021, 2022 гг.

Figure 9. Relative number of phytopathological indicators of development of particularly dangerous diseases of Trizo soft wheat, the values of which increased and significantly increased ($P < 0.05$) when using strains of associative rhizobacteria. 2019, 2021, 2022

Выводы. Результаты исследований показали, что изучаемые штаммы ассоциативных ризобактерий существенно повысили продуктивность мягкой пшеницы и улучшили фитосанитарное состояние ее посевов в условиях Ленинградской области, мы пришли к следующим выводам.

1. Наиболее выраженным полифункциональным действием на пшеницу обладал штамм *Bacillus subtilis* 124-11, применение которого повысило продуктивность и урожайность в среднем у сортов пшеницы Сударыня и Trizo на 83,1 – 95,2% по сравнению с контролем.

2. Применение указанного бактериального штамма привело к снижению развития корневой гнили на 19,1%, желтой ржавчины: по длине полосы с пустулами – на 24,1%, числу пустул в полосе – на 29,8%.

3. Наибольшим защитным действием в отношении комплекса особо опасных болезней обладал штамм *Sphingomonas* sp. K1B, после применения которого интенсивность развития корневой гнили снизилась на 19,1%; мучнистой росы по развитию болезни – на 5,6%, числу пятен с налетом – на 51,5%; желтой ржавчины по развитию болезни – на 6,8%, числу полос с пустулами – на 34,4%, числу пустул в полосе – на 32,1%.

4. При применении штамма *Pseudomonas fluorescens* SPB2137 отмечен максимальный рост числа и массы зерен в колоске колоса пшеницы (на 24,6 и 93,2%) по сравнению с действием других штаммов ассоциативных ризобактерий. Данная тенденция, помимо ростостимулирующего действия штамма бактерий на растение, возможно, связана со снижением пораженности растений корневой гнилью – на 18,7%, повышением устойчивости растений к желтой ржавчине, о чем свидетельствует снижение площади пустулы возбудителя на флаговом листе на 27,2% по сравнению с контролем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лачуга, Ю.Ф. Научно-техническая модернизация для качественного производства сельскохозяйственной продукции // *Зернобобовые и крупяные культуры*. – 2017. – № 3 (23). – С. 10–14.
2. Данилова, Т.А., Архипов, М.В., Моисеева, В.К., Тюкалов, Ю.А. Некоторые вопросы управления качеством и безопасностью растениеводческой продукции в зависимости от использования мероприятий по защите растений // *Теоретические и прикладные проблемы агропромышленного комплекса*. – 2020. – № 1 (43). – С. 15–20, DOI: 10.32935/2221-7312-2020-43-1-15-20.
3. Павлюшин, В.А., Новикова, И.И., Бойкова, И.В. Перспективы и возможности микробиологической защиты растений для повышения уровня экологической безопасности в агроценозах (обзор) // *Защита и карантин растений*. – 2022. – № 4. – С. 10–18, DOI: 10.47528/1026-8634_2022_4_10.
4. Шапошников, А.И., Белимов, А.А., Азарова, Т.С., Струнникова, О.К., Вишневская, Н.А., Воробьев, Н.И., Юзихин, О.С., Беспалова, Л.А., Тихонович, И.А. Взаимосвязь состава корневых экссудатов и эффективности взаимодействия растений пшеницы с микроорганизмами // *Прикладная биохимия и микробиология*. – 2023. – № 3 (59). – С. 260–274, DOI: 10.31857/S0555109923030170.
5. Asaf, S., Khan, A.L., Khan, M.A., Imran, Q.M., Yun, B.W., Lee, I.J. Osmoprotective functions conferred to soybean plants via inoculation with *Sphingomonas* sp. LK11 and exogenous trehalose // *Microbiological research*. – 2017. – № 205. – Pp. 135–145, DOI: 10.1016/j.micres.2017.08.009.
6. Idris, E.E., Iglesias, D.J., Talon, M., Borriss, R. Tryptophan-dependent production of indole-3-acetic acid (IAA) affects level of plant growth promotion by *Bacillus amyloliquefaciens* FZB42 // *Molecular plant-microbe interactions*. – 2007. – Vol. 20. – № 6. – Pp. 619–626, DOI: 10.1094/MPMI-20-6-0619.
7. Khan, A.L., Waqas, M., Kang, S.M., Al-Harrasi, A., Hussain, J., Al-Rawahi, A., Al-Khiziri, S., Ullah, I., Ali, L., Jung, H.Y., Lee, I.J. Bacterial endophyte *Sphingomonas* sp. LK11 produces gibberellins and IAA and promotes tomato plant growth // *Journal of Microbiology*. – 2014. – Vol. 52. – № 8. – Pp. 689–695, DOI: 10.1007/s12275-014-4002-7.

8. Grosskinsky, D.K., Tafner, R., Moreno, M.V., Stenglein, S.A., García de Salamone, I. E., Nelson, L. M., Novák, O., Strnad, M., Van der Graaff, E., Roitsch, T. Cytokinin production by *Pseudomonas fluorescens* G20–18 determines biocontrol activity against *Pseudomonas syringae* in Arabidopsis // Scientific Reports. – 2016. – Vol. 6. – № 1. – P. 23310, DOI: 10.1038/srep23310.
9. Kudoyarova, G.R., Melentiev, A.I., Martynenko, E.V., Timergalina, L.N., Arkhipova, T. N., Shendel, G.V., Kuz'mina, L.Y., Dodd, I. C., Veselov, S.Y. Cytokinin producing bacteria stimulate amino acid deposition by wheat roots // Plant physiology and biochemistry. – 2014. – № 83. – Pp. 285–291, DOI: 10.1016/j.plaphy.2014.08.015.
10. Shahzad, R., Waqas, M., Khan, A.L., Asaf, S., Khan, M.A., Kang, S.M., Yun, B.W., Lee, I.J. Seed-borne endophytic *Bacillus amyloliquefaciens* RWL-1 produces gibberellins and regulates endogenous phytohormones of *Oryza sativa*// Plant Physiology and Biochemistry. – 2016. – № 106. – Pp. 236–243, DOI: 10.1016/j.plaphy.2016.05.006.
11. Meyer, G. De, Capieau, K., Audenaert, K., Buchala, A., Metraux, J.P., Hofte, J.M. Nanogram amounts of salicylic acid produced by the rhizobacterium *Pseudomonas aeruginosa* 7NSK2 activate the systemic acquired resistance pathway in bean // Molecular Plant-Microbe Interactions. – 1999. – Vol. 12. – Pp. 450–458, DOI: 10.1094/MPMI.1999.12.5.450.
12. Максимов, И.В., Абизгильдина, Р.Р., Пусенкова, Л.И. Стимулирующие рост растений микроорганизмы как альтернатива химическим средствам защиты от патогенов (обзор) // Прикладная биохимия и микробиология. – 2011. – № 4 (47). – С. 333–345, DOI: 10.1134/S0003683811040090.
13. Штарк, О. Ю., Шапошников, А.И., Кравченко, Л.В. Продуцирование антифунгальных метаболитов *Pseudomonas chlororaphis* при росте на различных источниках питания // Микробиология. – 2003. – Т. 72. – № 5. – С. 645–650.
14. Балабан, Н.П., Шарипова, М.Р., Габдрахманова, Л.А., Марданова, А.М., Токмакова Ю.С., Соколова Е.А., Руденская Г.Н., Лещинская И.Б. Синтез и секреция протеиназ *Bacillus intermedius* на поздних стадиях спорообразования // Микробиология. – 2003. – № 3 (72). – С. 338–342.
15. Колесников, Л.Е., Новикова, И.И., Павлюшин, В.А., Зуев, Е.В., Колесникова Ю.Р. Моделирование эффективности штаммов *Bacillus subtilis* в зависимости от природно–климатических факторов при возделывании мягкой пшеницы // Российская сельскохозяйственная наука. – 2023. – № 4. – С. 29–37, DOI: 10.31857/S2500262723040063.

REFERENCES

1. Lachuga, Yu.F. (2017), “Scientific and technical modernization for high–quality production of agricultural products”, *Legumes and cereals*, no. 3 (23), pp. 10–14. (In Russ.).
2. Danilova, T.A., Arkhipov, M.V., Moiseeva, V.K. and Tyukalov, Yu.A. (2020), “Some issues of quality and safety management of crop production depending on the use of plant protection measures”, *Theoretical and applied problems of the agro-industrial complex*, no. 1 (43), pp. 15–20. (In Russ.), DOI: 10.32935/2221-7312-2020-43-1-15-20.
3. Pavlyushin, V.A., Novikova, I.I. and Boikova, I.V. (2022), “Prospects and possibilities of microbiological plant protection to increase the level of environmental safety in agrocenoses (review)”, *Protection and quarantine of plants*, no. 4, pp. 10–18. (In Russ.), DOI: 10.47528/1026-8634_2022_4_10.
4. Shaposhnikov, A. I., Belimov, A.A., Azarova, T.S., Strunnikova, O.K., Vishnevskaya, N.A., Vorobyov, N.I., Yuzikhin, O.S., Bepalova, L.A. and Tikhonovich I.A. (2023), “The relationship of the composition of root exudates and the effectiveness of the interaction of wheat plants with microorganisms”, *Applied Biochemistry and microbiology*, vol. 59, no. 3, pp. 260–274. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0555109923030170.

5. Asaf, S., Khan, A.L., Khan, M.A., Imran, Q.M., Yun, B.W. and Lee, I.J. (2017), “Osmoprotective functions conferred to soybean plants via inoculation with *Sphingomonas* sp. LK11 and exogenous trehalose”, *Microbiological research*, no. 205., pp. 135–145, DOI: 10.1016/j.micres.2017.08.009.
6. Idris, E.E., Iglesias, D.J., Talon, M. and Borriss, R. (2007), “Tryptophan–dependent production of indole–3–acetic acid (IAA) affects level of plant growth promotion by *Bacillus amyloliquefaciens* FZB42”, *Molecular plant–microbe interactions*, vol. 20, no. 6, pp. 619–626, DOI: 10.1094/MPMI-20-6-0619.
7. Khan, A.L., Waqas, M., Kang, S.M., Al–Harrasi, A., Hussain, J., Al–Rawahi, A., Al–Khiziri, S., Ullah, I., Ali, L., Jung, H.Y. and Lee, I.J. (2014), “Bacterial endophyte *Sphingomonas* sp. LK11 produces gibberellins and IAA and promotes tomato plant growth”, *Journal of Microbiology*, vol. 52, no. 8, pp. 689–695, DOI: 10.1007/s12275-014-4002-7.
8. Grosskinsky, D.K., Tafner, R., Moreno, M.V., Stenglein, S.A., García de Salamone, I. E., Nelson, L.M., Novák, O., Strnad, M., Van der Graaff, E. and Roitsch, T. (2016), “Cytokinin production by *Pseudomonas fluorescens* G20–18 determines biocontrol activity against *Pseudomonas syringae* in Arabidopsis”, *Scientific Reports*, vol. 6, no. 1, p. 23310, DOI: 10.1038/srep23310.
9. Kudoyarova, G.R., Melentiev, A.I., Martynenko, E.V., Timergalina, L.N., Arkhipova, T. N., Shendel, G.V., Kuz'mina, L.Y., Dodd, I.C. and Veselov, S.Y. (2014), “Cytokinin producing bacteria stimulate amino acid deposition by wheat roots”, *Plant physiology and biochemistry*, no. 83, pp. 285–291, DOI: 10.1016/j.plaphy.2014.08.015.
10. Shahzad, R., Waqas, M., Khan, A.L., Asaf, S., Khan, M.A., Kang, S.M., Yun, B.W. and Lee, I.J. (2016), “Seed-borne endophytic *Bacillus amyloliquefaciens* RWL–1 produces gibberellins and regulates endogenous phytohormones of *Oryza sativa*”, *Plant Physiology and Biochemistry*, no. 106, pp. 236–243, DOI: 10.1016/j.plaphy.2016.05.006.
11. Meyer, G. De, Capieau, K., Audenaert, K., Buchala, A., Metraux, J.P. and Hofte, J.M. (1999), “Nanogram amounts of salicylic acid produced by the rhizobacterium *Pseudomonas aeruginosa* 7NSK2 activate the systemic acquired resistance pathway in bean” *Molecular Plant-Microbe Interactions*, vol. 12, pp. 450–458, DOI: 10.1094/MPMI.1999.12.5.450.
12. Maksimov, I.V., Abizgildina, R.R. and Pusenkova, L.I. (2011), “Plant growth promoting microorganisms as alternative to chemical protection from pathogens (review)”, *Applied Biochemistry and microbiology*, vol. 47, no. 4, pp. 333–345, DOI: 10.1134/S0003683811040090.
13. Shtark, O.Yu., Shaposhnikov, A.I. and Kravchenko, L.V. (2003), “Production of antifungal metabolites of *Pseudomonas chlororaphis* during growth on various food sources”, *Microbiology*, vol. 72, no. 5, pp. 645–650. (In Russ.).
14. Balaban, N.P., Sharipova, M.R., Gabdrakhmanova, L.A., Mardanova, A.M., Tokmakova, Y.S., Sokolova, E.A., Rudenskaya, G.N. and Leshchinskaya, I.B. (2003), “Synthesis and secretion of *Bacillus intermedius* proteinases in the late stages of sporulation”, *Microbiology*, vol. 72, no. 3, pp. 338–342. (In Russ.).
15. Kolesnikov, L.E., Novikova, I.I., Pavlyushin, V.A., Zuev, E.V. and Kolesnikova, Yu.R. (2023), “Modeling the effectiveness of *Bacillus subtilis* strains depending on natural and climatic factors in the cultivation of soft wheat”, *Russian agricultural science*, no. 4, pp. 29–37. (In Russ.), DOI: 10.31857/S2500262723040063.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Леонид Евгеньевич Колесников, кандидат биологических наук, доцент, заведующий кафедрой защиты и карантина растений, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет», г. Пушкин, г. Санкт-Петербург, Россия; <https://orcid.org/0000-0003-3765-1192>, SPIN-код: 4111-2369; e-mail: kleon9@yandex.ru.

Хассан Башар Абд Хассан, научный сотрудник, Министерство сельского хозяйства/управление сельскохозяйственных исследований, г. Багдад, Ирак; аспирант кафедры защиты и карантина растений, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет», г. Пушкин, г. Санкт-Петербург, Россия; <https://orcid.org/0000-0001-8395-9580>; e-mail: bashar_alamiry@yahoo.com.

Андрей Алексеевич Белимов, доктор биологических наук, заведующий лабораторией ризосферной микрофлоры, федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной микробиологии», г. Пушкин, г. Санкт-Петербург, Россия; <https://orcid.org/0000-0002-9936-8678>, SPIN-код: 5630-5537; e-mail: belimov@rambler.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Leonid E. Kolesnikov, Cand. Sci. (Biol.), Associate Professor, Head of the Department of Plant Protection and Quarantine, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Saint-Petersburg State Agrarian University", Pushkin, St. Petersburg, Russia; <https://orcid.org/0000-0003-3765-1192>, SPIN-code: 4111-2369; e-mail: kleon9@yandex.ru.

Hassan Bashar Abd Hassan, Ministry of Agriculture, Agricultural Research Office, Abo-Ghraib, St. Al-Zaytun, H. 10081, Baghdad, Iraq; postgraduate student of the Department of Plant Protection and Quarantine, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Saint-Petersburg State Agrarian University", Pushkin, St. Petersburg, Russia; <https://orcid.org/0000-0001-8395-9580>; e-mail: bashar_alamiry@yahoo.com.

Andrey A. Belimov, Doc. Sci. (Biol.), Head of the Laboratory of Rhizospheric Microflora, Federal State Budgetary Scientific Institution "All-Russian Scientific Research Institute of Agricultural Microbiology", Pushkin, St. Petersburg, Russia; <https://orcid.org/0000-0002-9936-8678>, SPIN-code: 5630-5537; e-mail: belimov@rambler.ru.

Авторский вклад. Все авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении и анализе данного исследования. Все авторы настоящей статьи ознакомились и одобрили представленный окончательный вариант. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Author's contribution. All authors of this research paper have directly participated in the planning, execution, or analysis of this study. All authors of this paper have read and approved the final version submitted.

The authors declare no conflict of interest

Поступила в редакцию / Received 26.06.2024

Поступила после рецензирования / Revised 01.08.2024

Принята к публикации / Accepted 20.08.2024

Научная статья/Original article

УДК 633.491:579.64

Код ВАК 4.1.1

DOI: 10.24411/2078-1318-2024-3-60-70

ВЛИЯНИЕ БИОПРЕПАРАТА РИЗОБАКТ НА ПРОДУКТИВНОСТЬ И КАЧЕСТВО СОРТОВ КАРТОФЕЛЯ, ПЕРСПЕКТИВНЫХ ДЛЯ ДИЕТИЧЕСКОГО ПИТАНИЯ

Е.В. Рогозина¹ , С.Д. Киру² ✉, О.А. Горшков^{1,2} , А.А. Попов³ , А.Е. Соловьева¹ 

¹Федеральный исследовательский центр

«Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова»

г. Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный аграрный университет

г. Пушкин, г. Санкт-Петербург, Россия

✉ s.kiru53@mail.ru

³ООО «Петербургские Биотехнологии»

пос. Тярлево, Пушкинский район, г. Санкт-Петербург, Россия

Реферат. Картофель с окрашенной мякотью клубней отличается высоким содержанием антиоксидантов и полезен для диетического питания. Факторы внешней среды влияют на биохимический состав, в том числе на содержание полифенолов и антоцианинов в клубнях сортов с желтой, фиолетовой и красной мякотью. Известно, что применение биопрепаратов оказывает положительный эффект на урожайность и качество продукции многих сельскохозяйственных культур. Изучение влияния биопрепаратов на урожайность и качество клубней картофеля актуально для разработки новых инновационных безопасных технологий в сельском хозяйстве России. Цель исследования – оценить эффективность применения биопрепарата Ризобакт для предпосадочной обработки клубней отечественных сортов картофеля, перспективных для диетического питания. Использованы 4 штамма препарата Ризобакт (марка р.ж.ф., госрегистрация № 298-19-1312-1) на основе ризосферных бактерий *Corynebacterium* sp. для обработки клубней сортов Эликсред, Фиолетовый, Нарымская ночка и Северное сияние. Действие штаммов Ризобакта определяли при оценке продуктивности сортов (средний урожай в граммах с 1 куста), товарности (отношение массы товарных клубней, то есть весом не менее 40 г, к общей массе клубней) и содержания антоцианов в клубнях через два месяца после сбора урожая. Установлена неоднозначность действия разных штаммов Ризобакта на продуктивность и качество клубней изученных сортов картофеля. Наибольший положительный эффект оказало применение штамма М, при обработке которым продуктивность сортов Эликсред и Северное сияние составила 927,2 г/куст и 831,5 г/куст соответственно, повысилась товарность клубней у всех 4 сортов в опыте и получено самое высокое содержание антоцианов – 711,67 мг/100 г в клубнях сорта Северное сияние.

Ключевые слова: картофель, ризосферные бактерии, продуктивность, антоцианы, Ризобакт

Для цитирования. Рогозина, Е.В., Киру, С.Д., Горшков, О.А., Попов, А.А., Соловьева, А.Е. Влияние биопрепарата Ризобакт на продуктивность и качество сортов картофеля, перспективных для диетического питания / Е. В. Рогозина [и др.] // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2024. – № 3 (77). – С. 60–70. – DOI: 10.24411/2078-1318-2024-3-60-70.


Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания согласно тематическому плану ВИР по проекту FGEM-2022-0004 «Совершенствование подходов и методов ex situ сохранения идентифицированного генофонда вегетативно размножаемых культур и их диких родичей, разработка технологий их эффективного использования в селекции».

INFLUENCE OF RHIZOBACT BIOPREPARATION ON PRODUCTIVITY
AND QUALITY OF POTATO VARIETIES PROMISING FOR DIETARY
NUTRITIONE.V. Rogozina¹ , S.D. Kiru²  , O.A. Gorshkov^{1, 2} , A.A. Popov³ , A.E. Solovyeva¹ ¹N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources

St. Petersburg, Russia

²Saint-Petersburg State Agrarian University

Pushkin, St. Petersburg, Russia

 s.kiru53@mail.ru³LLC "Petersburg Biotechnologies",

Tyarlevo, Pushkin, St. Petersburg, Russia

Abstract. Potatoes with coloured tuber flesh are characterised by a high content of antioxidants and are useful for dietary purposes. Environmental factors affect the biochemical composition, including the content of polyphenols and anthocyanins in tubers of yellow, purple and red flesh varieties. It is known that the use of biopreparations has a positive effect on the yield and quality of products of many agricultural crops. Studying the influence of biological products on the yield and quality of potato tubers is important for the development of new innovative safe technologies in Russian agriculture. The aim of the study is to evaluate the effectiveness of Rizobact biopreparation application for pre-planting treatment of tubers of domestic potato varieties promising for dietary nutrition. Four strains of the Rhizobact (brand r.zh.f., state registration No. 298-19-1312-1), based on rhizosphere bacteria *Corynebacterium* sp., were used to treat seed potatoes. Four potato varieties with colored tuber flesh were tested in the study: 'Elixred', 'Fioletovyi', 'Narymskaya Nochka' and 'Severnoe siyanie'. The effect of Rizobact strains was determined by assessing the productivity of varieties (average yield in grams per 1 bush), marketability (the ratio of the weight of marketable tubers, i.e. weighing at least 40 g to the total weight of tubers) and the content of anthocyanins in tubers two months after harvesting. The ambiguity of the effect of different Rhizobact strains on the productivity and quality of tubers of the studied potato varieties has been established. The Rhizobact strain M had a positive effect on the yield of 'Elixred' and 'Severnoe siyanie'. Pre-planting treatment of the strain M resulted in higher yields of both varieties (up to 927.2 g/plant and 831.5 g/plant, respectively) compared with the controls. Application of the Rhizobact strain M increased marketability in all four varieties. The Rhizobact strains impact on the content of anthocyanins in tubers was strongly modified with potato varieties. The highest concentrations of anthocyanins (711.67 mg/100 g) were accumulated in the tubers of 'Severnoe siyanie' when the Rhizobact strain M had been applied.

Keywords: potato, rhizospheric bacteria, productivity, anthocyanins, Rhizobact

For citation: Rogozina, E.V., Kiru, S.D., Gorshkov, O.A., Popov, A.A., Solovyeva, A.E. (2024) 'Influence of Rhizobact biopreparation on productivity and quality of potato varieties promising for dietary nutrition', *Izvestia of Saint-Petersburg State Agrarian University*, vol. 77, no. 3, pp. 60–70. (In Russ.) DOI: 10.24411/2078-1318-2024-3-60-70.

Financing: The work was carried out within the framework of the state task according to the thematic plan of the VIR project FGEM-2022-0004 "Improvement of approaches and methods for ex situ conservation of the identified gene pool of vegetatively propagated crops and their wild relatives, development of technologies for their effective use in breeding".

Введение. Картофель – одна из основных продовольственных культур, занимающая 3 место по значимости (после пшеницы и риса) в питании населения планеты. Важность его как пищевого продукта для населения РФ обусловлена, прежде всего, высокой питательной ценностью и сбалансированным соотношением в клубнях ценных компонентов, имеющих

большое значение для здоровья современного человека [1]. В клубнях картофеля содержатся углеводы, протеин, жиры, клетчатка, витамины, минеральные вещества, антиоксиданты. Фенольные соединения, запасные белки, антоцианы, витамины и каротиноиды картофеля могут оказывать положительное влияние на организм, проявляя антираковые, гипохолестеринемические, противовоспалительные и антидиабетические свойства [2].

В настоящее время особое внимание уделяется выращиванию картофеля с окрашенной антоцианами и каротиноидами мякотью. Спрос на него возрос в связи с полезными свойствами этих веществ, что доказано многими исследователями. Сорта картофеля с красной и фиолетовой мякотью имеют высокую диетическую ценность, так как являются источниками полифенольных соединений с антиоксидантной активностью, прежде всего, антоцианов [3-5]. Селекционерами разных стран создано более 40 сортов картофеля с антоциановой окраской мякоти и несколько сотен сортов с высокой концентрацией каротиноидов (клубни с яркой, насыщенной желтой мякотью), что представляет большой интерес для профилактики здоровья населения. В клубнях с белой и желтой мякотью присутствует до 30 мг флавоноидов (антоцианинов) на 100 г сырой мякоти, а в клубнях с красной, синей или фиолетовой мякотью их содержится в 2,0–2,5 раза больше. Красная мякоть картофеля содержит гликозид пеларгодин, а фиолетовая также содержит гликозиды мальвидин, петундин, пионидин и дельфинидин. По уровню гидрофилической антиоксидантной способности красная, синяя и фиолетовая мякоть клубней картофеля сопоставима с капустой брокколи, брюссельской капустой и шпинатом. Таким образом, картофель должен рассматриваться как продукт, который обладает высокой антиоксидантной способностью, которая зависит от цвета и биохимического состава его клубней [6]. Доказано, что концентрация таких антиоксидантов, как зеаксантин и лютеин, в клубнях с окрашенной антоцианом мякотью в 4 раза больше, чем с белой или желтой мякотью [7]. У клубней с фиолетовой мякотью антиоксидантная способность в 6-7 раз выше, чем с белой или желтой.

Экспериментально доказано влияние факторов внешней среды (географические, почвенно-климатические, обеспеченность питательными элементами) на биохимический состав клубней картофеля, в том числе на общее содержание полифенолов и отдельных антоцианинов в клубнях сортов с желтой, фиолетовой и красной мякотью [8, 9]. Условия окружающей среды существенно влияют на содержание фенолов и их антиоксидантную способность, однако генотип (сорт) оказался наиболее определяющим фактором наблюдаемых вариаций [10]. Литовские ученые оценили влияние агрохимических свойств почвы (содержание доступных форм фосфора, калия, азота – нитратного, нитритного и минерального) и биологических активизаторов почвы на основе бактериальных штаммов на биохимические качества клубней картофеля (общее содержание полифенолов, общее содержание антоцианов и антиоксидантную активность). Было установлено, что опрыскивание почвы препаратом БД 501 приводило к повышению содержания антоцианов в клубнях сортов Blue Kongo и Vitelotte и Red Emely, фенольных соединений в клубнях Blue Kongo и Red Emely, но не оказывало существенного влияния на сорт Vitelotte [11].

Развитие АПК и рыбохозяйственного комплекса РФ на период до 2030 г. предусматривает разработку новых инновационных безопасных технологий, повышающих качество продукции⁸. В сельскохозяйственной отрасли в последние годы активно применяют

⁸ Стратегия устойчивого развития сельских территорий Российской Федерации на период до 2030 года. – URL: <http://static.government.ru/media/files/G3hzRyrGPbmFAfBFgmEhxTrec694MaHp.pdf> (дата обращения 04.03.2024).

микробиологические препараты как альтернативу химическим средствам защиты для улучшения роста, развития растений, повышения урожая и его качества. Наибольший эффект оказывает применение биопрепаратов на бобовых культурах, известно об их положительном влиянии на урожайность и качество продукции зерновых культур и многолетних трав [12]. Инокуляция бактериями, способствующими усвоению фосфора и калия, эндофитами, в особенности арбускулярной микоризой, положительно влияет на урожайность и оказывает защитное действие против поражения картофеля грибными и бактериальными заболеваниями [13], повышает содержание крахмала и сухого вещества в клубнях [14].

В исследовании польских ученых по оценке эффективности предпосадочной обработки клубней 14 сортов картофеля биопрепаратом EM генотипическая изменчивость также играла доминирующую роль в сравнении с влиянием биопрепарата на урожайность и качество клубней [14]. Установлено, что после внесения биопродукта на основе *Bacillus subtilis* и штамма *Trichoderma harzianum* в борозды при посадке картофеля в ризосфере растений картофеля увеличивается относительная доля полезных бактерий, что может оказывать благотворное влияние на урожайность клубней [17]. Однако обзор ранее полученных результатов по инокуляции ряда сельскохозяйственных культур, в том числе и картофеля, бактериями, способствующими росту растений, эндофитами и арбускулярными микоризными грибами свидетельствует о необходимости тщательного отбора инокулянтов, чтобы обеспечить совместимое сочетание хозяина, микробного сообщества, субстрата и биопрепарата [13].

Испытания в разных регионах РФ свидетельствуют о положительном действии биопрепаратов на урожайность и сохранность клубней картофеля [15, 16]. Особенно это актуально для сортов, используемых в диетическом питании. В условиях Северо-Западного региона России такие исследования не проводились.

Цель исследования – оценить влияние препарата Ризобакт на продуктивность и содержание антоцианов в клубнях отечественных сортов картофеля, перспективных для диетического питания.

Материалы и методы. Изучены 4 сорта картофеля отечественной селекции: Эликсред, Фиолетовый, Нарымская ночка и Северное сияние из коллекции, сохраняемой в Федеральном исследовательском центре «Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова» (ВИР). Сорта относятся к разным группам по скороспелости и различаются по окраске кожуры и мякоти (таблица 1).

Таблица 1. Характеристика исследованных сортов картофеля
Table 1. Characteristics of the studied potato varieties

№ п/п	Номер каталога ВИР	Название сорта	Группа спелости	Год включения в Госреестр	Окраска кожуры	Окраска мякоти
1	25509	Эликсред	ср. ранний	не включен	красная	красная
2	25220	Фиолетовый	ср. поздний	2014	фиолетовая	фиолетовая
3	25525	Нарымская ночка	нет данных	не включен	фиолетовая	бело-фиолетовая
4	25344р	Северное сияние	ср. спелый	2018	фиолетовая	фиолетовая

Оригинатор сортов Эликсред, Фиолетовый и Северное сияние – ФИЦ картофеля им. А.Г. Лорха. Оригинатор сорта Нарымская ночка – Сибирский НИИСХиТ – филиал СФНЦ РАН.

Посадка и наблюдения за растениями проведены в соответствии с методическими указаниями по поддержанию и изучению мировой коллекции картофеля⁹.

В двухфакторном опыте изучали различные сорта картофеля и разные биопрепараты. Контроль – клубни тех же сортов без обработки. Каждый сорт в варианте представлен шестью растениями. В качестве биопрепарата применяли Ризобакт (марка р.ж.ф., гос. регистрация № 298-19-1312-1), на основе ризосферных бактерий *Corynebacterium* sp., 4 различных штаммов: штамм М, штамм Я, штамм Сл и штамм Н6. Титр – 5×10^9 КОЕ/мл. Биопрепарат применялся в дозе 0,1 л/т клубней, при которой инокуляционная нагрузка на клубень картофеля составила $10,5 \times 10^6$ КОЕ/шт. Каждый штамм использовали в опыте как отдельный вариант.

Клубни обрабатывали биопрепаратами непосредственно перед посадкой. Опыт проведен в НПБ Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР. Почва опытного участка ВИР дерново-подзолистая, супесчаная с легким суглинком, содержание гумуса 3,0-3,5%, рН_{кcl} 4,8-5,1. Агротехника выращивания картофеля – типовая для Северо-Западного региона РФ. Посадка проведена 16 мая.

Действие штаммов Ризобакт определяли при оценке продуктивности сортов картофеля (средний урожай в граммах с 1 куста) и товарности (отношение массы товарных клубней, то есть весом не менее 40 г, к общей массе клубней). Биохимический анализ содержания антоцианов в клубнях проведен через два месяца после сбора урожая. Для анализа отбирали по одному типичному клубню (массой 50-90 г) с 10 хорошо развитых растений каждого сорта и варианта опыта. Из отобранных для анализа клубней формировали объединенную пробу, которую хранили при температуре +2...+4 °С до проведения биохимического анализа. Для подготовки проб каждый клубень разрезали вдоль и брали одну половинку, которую затем измельчали, формируя объединенную пробу. Антоцианы извлечены экстракцией раствором 1% соляной кислоты с последующим спектрофотометрированием при длине волны 510 нм, в пересчете на цианидин-3,5-дигликозид (453), данные приведены на сырое вещество.

Статистический анализ результатов опыта выполнен по методике Б.А. Доспехова¹⁰ с использованием MS Excel.

Результаты исследования. Средняя продуктивность изученных сортов картофеля в 2023 г составила $520,3 \pm 27,9$ г/куст, изменчивость по продуктивности значительная – коэффициент вариации 58%. Среди 4 сортов лучшим по продуктивности был Эликсред (таблица 2, рисунок 1). Однако у этого сорта наблюдали максимальный размах изменчивости: от одного мелкого клубня (массой 18 г) на одном из растений в варианте со штаммом Сл до 24 клубней (общей массой 1382 г) на одном из растений в варианте со штаммом М. Различия между сортами Эликсред, Северное сияние и Нарымская ночка по продуктивности

⁹ Методические указания по поддержанию и изучению мировой коллекции картофеля / РАСХН, Государственный научный центр Российской Федерации Всероссийский научно-исследовательский институт растениеводства имени Н. И. Вавилова. – СПб.: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова", 2010. – 30 с.

¹⁰ Доспехов, Б.А. Методика полевого опыта. – М.: Агропромиздат, 1985. – 351 с.

достоверны во всех вариантах опыта, сорт Эликсред также значимо превосходит по продуктивности сорт Фиолетовый (рисунок 1).

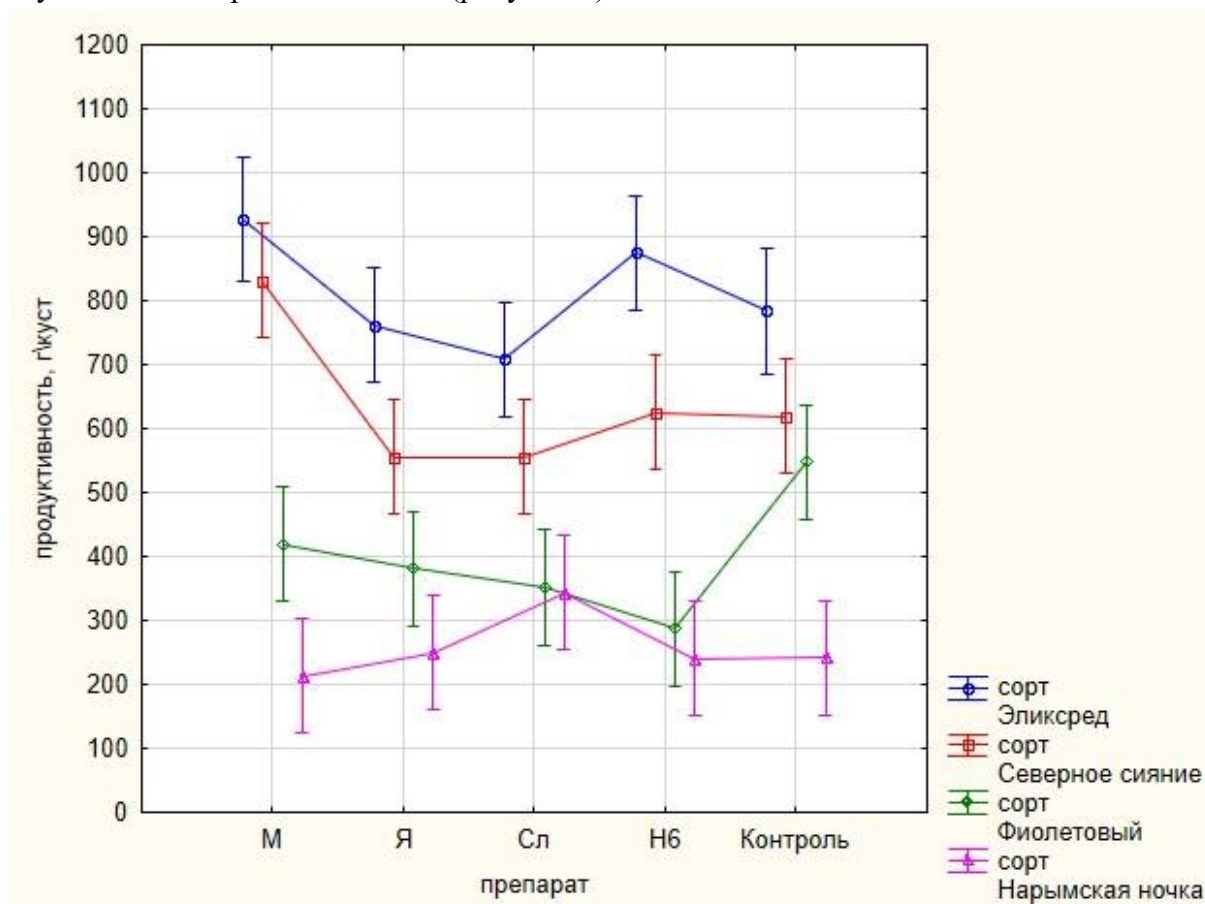


Рисунок 1. Влияние штаммов Ризобакт на продуктивность сортов картофеля
Figure 1. Influence of Rhizobact strains on potato tubers yield

Таблица 2. Продуктивность сортов картофеля (г/куст), Пушкин, 2023 г.
Table 2. Productivity of potato varieties (g/plant), Pushkin, 2023

Сорт	Контроль ¹	Штаммы Ризобакт			
		М	Я	Сл	Н6
Эликсред	783,6±109,4	927,2±137,7*	761,5±127,5	708,7±164,9	875,2±96,6
Северное сияние	619,7±83,5	831,5±109,5*	556,0±137,1	555,2±90,1	625,8±82,6
Фиолетовый	547,7±98,7	418,5±81,2*	380,7±45,9*	351,5±39,9*	286,8±27,5*
Нарымская ночка	241,7±32,4	213,0±9,8	249,3±23,3	343,8±48,3*	239,8±78,2
НСР ₀₅	243,22	268,36	287,05	292,81	-

¹х±s_x, * отмечены статистически достоверные различия с контрольным вариантом.

Продуктивность сорта Эликсред по сравнению с контролем повысилась на 18% при использовании штамма М и на 11% в варианте со штаммом Н6. Продуктивность сорта Северное сияние была выше на 34% в варианте со штаммом М (таблица 2). У сорта Фиолетовый при использовании биопрепаратов продуктивность снизилась на 24% в варианте со штаммом М и на 31-48% в вариантах с остальными штаммами Ризобакт (таблица 2). У сорта

Нарымская ночка отмечена самая низкая продуктивность в опыте (рисунок 1). Хотя в варианте со штаммом Сл продуктивность сорта повысилась на 42%, этот сорт остался самым малопродуктивным (таблица 2). Различия в продуктивности сорта Северное Сияние при обработке штаммом М по сравнению с контролем статистически значимы.

Средняя товарность в изученной выборке сортов картофеля составила 73%. Изменчивость этого показателя у сортов Нарымская ночка и Фиолетовый незначительная (4,5-7,2 %), у сортов Эликсред и Северное сияние высокая (20-25%). Товарность сорта Северное сияние несколько выше, чем у сортов Эликсред и Нарымская ночка, самая низкая – у сорта Фиолетовый (таблица 3).

Таблица 3. Товарность клубней (%), Пушкин, 2023 г.
Table 3. Marketability of potato tubers (%), Pushkin, 2023

Сорт	Контроль ¹	Штаммы Ризобакт			
		М	Я	Сл	Н6
Эликсред	77,2±4,5	77,6±5,3	79,3±4,0	66,1±13,3	68,7±5,9
Северное сияние	75,3±6,9	81,3±5,8	80,2±1,9	72,9±9,9	77,0±5,9
Фиолетовый	63,1±7,7	79,7±6,1*	65,3±6,0	76,6±4,0*	65,1±9,4
Нарымская ночка	67,9±14,3	81,7±5,9	72,5±10,2	87,4±2,2*	52,9±17,4

¹ $\bar{x} \pm s_x$, * отмечены статистически достоверные различия с контрольным вариантом

В вариантах со штаммами М и Я товарность клубней повысилась у всех сортов картофеля (таблица 3). Применение штамма Сл положительно влияло на товарность сортов Фиолетовый и Нарымская ночка, штамма Н6 – на товарность сортов Фиолетовый и Северное сияние. Различия в товарности сорта Фиолетовый при обработке штаммами М и Сл, сорта Нарымская ночка при обработке штаммом Сл по сравнению с контролем статистически значимы.

Содержание антоцианов в клубнях четырех сортов картофеля изменяется от 2,9 до 711,7 мг/100 г (таблица 4).

Таблица 4. Содержание антоцианов (мг/100 г) в клубнях, Пушкин, 2023 г.
Table 4. The concentrations of total anthocyanins in potato tubers, Pushkin, 2023

Сорт	Контроль	Штаммы			
		М	Я	Сл	Н6
Эликсред	31,3	10,3	17,0	2,9	23,3
Северное сияние	626,2	711,7	577,4	588,9	588,9
Фиолетовый	76,2	85,1	74,9	87,4	106,9
Нарымская ночка	52,0	14,0	45,6	36,1	81,2

Наибольшим содержанием антоцианов отличается сорт Северное сияние, имеющий фиолетовую окраску кожуры и мякоти. У сорта Фиолетовый, также с темно-фиолетовой окраской мякоти клубней, содержание антоцианов в 5-8 раз меньше (таблица 4).

Применение штамма М повысило содержание антоцианов в клубнях сортов Северное сияние и Фиолетовый на 13% и 12% соответственно. Более заметный эффект оказало применение штамма Н6 на сортах Фиолетовый и Нарымская ночка, где содержание антоцианов увеличилось на 40 и 56%, соответственно. Штаммы М и Сл негативно повлияли на содержание антоцианов в клубнях сорта Нарымская ночка. У сорта Эликсред во всех вариантах с биопрепаратами содержание антоцианов уменьшилось, а в наибольшей степени при использовании штаммов М и Сл (таблица 4).

Выводы. Впервые в условиях Ленинградской области изучено влияние предпосадочной обработки препаратом Ризобакт клубней отечественных сортов картофеля. Установлена неоднозначность действия четырех штаммов препарата Ризобакт на продуктивность, товарность и содержание антоцианов в клубнях сортов Эликсред, Фиолетовый, Нарымская ночка и Северное сияние. Наибольший положительный эффект оказало применение штамма М, при обработке которым продуктивность сортов Эликсред и Северное сияние составила 927,2 г/куст и 831,5 г/куст соответственно, повысилась товарность клубней всех четырех сортов и было получено самое высокое содержание антоцианов в клубнях сорта Северное сияние (711,67 мг/100 г).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Картофелеводство России: состояние и перспективы в новых условиях / Е.А. Симаков и др. // Картофель и овощи. – 2022. – № 4. – С. 3–6. – <https://doi.org/10.25630/PAV.2022.80.38.001>.
2. Hellmann, H., Goyer, A., Navarre, D.A. (2021) 'Antioxidants in Potatoes: A Functional View on One of the Major Food Crops Worldwide', *Molecules*, no. 26, pp. 24–46, <https://doi.org/10.3390/molecules26092446>.
3. Brown, C. et al. (2003) 'Breeding studies in potatoes containing high concentrations of anthocyanins', *American Journal of Potato Research*, no. 80 (4), pp. 241–249.
4. Поливанова, О.Б., Гинс, Е.М. Антиоксидантная активность пигментированного картофеля (*Solanum tuberosum* L.), содержание антоцианов, их биосинтез и физиологическая роль // Овощи России. – 2019. – № 6. – С. 84–90. – <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2019-6-84-90>.
5. Состав и содержание антоцианов в диетических сортах картофеля (*Solanum tuberosum* L.), перспективных для выращивания и селекции в условиях Дальнего Востока России / И. В. Ким и др. // Сельскохозяйственная биология. – 2020. – № 55(5). – С. 995–1003. – DOI: 10.15389/agrobiology.2020.5.995rus.
6. Brown, C.R. et al. (2007) 'Anthocyanin, carotenoid content, and antioxidant values in native South American potato cultivars', *HortScience*, no. 42, pp. 1733–1736.
7. Brown C.R. (2008) 'Breeding for phytonutrient enhancement of potato', *Am. J. Pot. Res*, no. 85, pp. 298–307.
8. Hamouz K. et al. (2010) 'Effect of natural and growing conditions on the content of phenolics in potatoes with different flesh colour', *Plant Soil Environ*, no. 56(8), pp. 368–374, DOI: 10.17221/49/2010-PS.
8. Hamouz, K. et al. (2013) 'Effect of cultivar, location and method of cultivation on the content of chlorogenic acid in potatoes with different flesh colour', *Plant, Soil and Environment, Czech Academy of Agricultural Sciences*, vol. 59, no. 10, pp. 465–471.
9. André C.M. et al. (2009) 'Influence of environment and genotype on polyphenol compounds and in vitro antioxidant capacity of native Andean potatoes (*Solanum tuberosum* L.)', *Journal of Food Composition and Analysis*, no. 22, pp. 517–524.

10. André C.M. et al. (2009) 'Influence of environment and genotype on polyphenol compounds and in vitro antioxidant capacity of native Andean potatoes (*Solanum tuberosum* L.)', *Journal of Food Composition and Analysis*, no. 22, pp. 517–524.
11. Jariéné, E. et al. (2017) 'Effect of biodynamic preparations on the phenolic antioxidants in potatoes with coloured-flesh', *Biological Agriculture & Horticulture*, pp. 1-11, DOI: 10.1080/01448765.2017.1313174.
12. Завалин, А.А. Применение биопрепаратов при возделывании полевых культур // Достижения науки и техники АПК. 2011. – № 8. – С. 9–11. – <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-biopreparatov-pri-vozdelyvanii-polevyh-kultur> (04.03.2024).
13. Wu, F. et al. (2013) 'Prospect of beneficial microorganisms applied in potato cultivation for sustainable agriculture', *African Journal of Microbiology Research*, no. 7, pp. 2150–2158.
14. Pszczółkowski, P. et al. (2023) 'The Use of Effective Microorganisms as a Sustainable Alternative to Improve the Quality of Potatoes in Food Processing', *Appl. Sci.*, no. 13, p. 7062, <https://doi.org/10.3390/app13127062>.
15. Терехина, О.Н., Виноградов, Д.В. Урожайность и качество клубней картофеля при использовании биопрепаратов // Вестник РГАТУ. – № 1 (41). – С. 155–159.
16. Николаева, Ф.В., Лукина, Ф.А. Использование биологических препаратов при возделывании картофеля в Якутии // Аграрная наука. – 2020. – № 7–8. – С. 124–126. – <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2020-340-7-124-126>.
17. Wang, Z. et al. (2021) 'A microbial consortium-based product promotes potato yield by recruiting rhizosphere bacteria involved in nitrogen and carbon metabolisms', *Microb. Biotechnol.*, no. 14(5), pp. 1961–1975.

REFERENCES

1. Simakov, E.A. et al. (2022) 'Potato growing in Russia: current state and prospects under new condition', *Potato and veg.*, no. 4, pp. 3–6, <https://doi.org/10.25630/PAV.2022.80.38.001> (In Russ.).
2. Hellmann, H., Goyer, A., Navarre, D.A. (2021) 'Antioxidants in Potatoes: A Functional View on One of the Major Food Crops Worldwide', *Molecules*, no. 26, pp. 24–46, <https://doi.org/10.3390/molecules26092446>.
3. Brown, C. et al. (2003) 'Breeding studies in potatoes containing high concentrations of anthocyanins', *American Journal of Potato Research*, no. 80 (4), pp. 241–249.
4. Polivanova, O.B., Gins, E.M. (2019) 'Antioxidant activity of potatoes (*Solanum tuberosum* L.) and anthocyanin content, its biosynthesis and physiological role', *Vegetable crops of Russia*, no. 6, pp. 84–90 (in Russ.), <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2019-6-84-90>.
5. Kim, I.V. et al. (2020) 'Composition and quantification of antocians in healthy-diet potato (*Solanum tuberosum* L.) varieties for growing and selection in the Russian Far East', *Agricultural Biology*, no. 55(5), pp. 995–1003 (In Russ.). DOI: 10.15389/agrobiology.2020.5.995eng.
6. Brown, C.R. et al. (2007) 'Anthocyanin, carotenoid content, and antioxidant values in native South American potato cultivars', *HortScience*, no. 42, pp. 1733–1736.
7. Brown C.R. (2008) 'Breeding for phytonutrient enhancement of potato', *Am. J. Pot. Res.*, no. 85, pp. 298–307.
8. Hamouz, K. et al. (2013) 'Effect of cultivar, location and method of cultivation on the content of chlorogenic acid in potatoes with different flesh colour', *Plant, Soil and Environment, Czech Academy of Agricultural Sciences*, vol. 59, no. 10, pp. 465–471.
9. André C.M. et al. (2009) 'Influence of environment and genotype on polyphenol compounds and in vitro antioxidant capacity of native Andean potatoes (*Solanum tuberosum* L.)', *Journal of Food Composition and Analysis*, no. 22, pp. 517–524.

10. André C.M. et al. (2009) 'Influence of environment and genotype on polyphenol compounds and in vitro antioxidant capacity of native Andean potatoes (*Solanum tuberosum* L.)', *Journal of Food Composition and Analysis*, no. 22, pp. 517–524.
11. Jariénè, E. et al. (2017) 'Effect of biodynamic preparations on the phenolic antioxidants in potatoes with coloured-flesh', *Biological Agriculture & Horticulture*, pp. 1-11, DOI: 10.1080/01448765.2017.1313174.
12. Zavalin A.A. (2011) 'The use of biologics in the cultivation of field crops', *Achievements of Science and Technology of AIC*, no. 8, pp. 9–11 <https://cyberleninka.ru/article/n/primeneniye-biopreparatov-pri-vozdelyvanii-polevyh-kultur> (04.03.2024) (In Russ.).
13. Wu, F. et al. (2013) 'Prospect of beneficial microorganisms applied in potato cultivation for sustainable agriculture', *African Journal of Microbiology Research*, no. 7, pp. 2150–2158.
14. Pszczółkowski, P. et al. (2023) 'The Use of Effective Microorganisms as a Sustainable Alternative to Improve the Quality of Potatoes in Food Processing', *Appl. Sci.*, no. 13, p. 7062, <https://doi.org/10.3390/app13127062>.
15. Terekhina, O.N., Vinogradov, D.V. (2019) 'The quality of potato tubers when using biologics', *Herald of Ryazan SATU*, no. 1 (41), pp. 155–159 (in Russ.).
16. Nikolaeva, F.V., Lukina, F.A. (2020) 'Aspects of using interspecific hybridization of goats', *Agrarian science*, no. 7-8, pp. 124–126. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2020-340-7-124-126> (In Russ.).
17. Wang, Z. et al. (2021) 'A microbial consortium-based product promotes potato yield by recruiting rhizosphere bacteria involved in nitrogen and carbon metabolism', *Microb. Biotechnol.*, no. 14 (5), pp. 1961–1975.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Елена Вячеславовна Рогозина, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник отдела генетических ресурсов картофеля, Федеральный исследовательский центр «Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова» (ВИР), Санкт-Петербург, Россия; <https://orcid.org/0000-0002-2743-068X>, SPIN-код: 2407-1201, Author ID: 166172; e-mail: erogozina@vir.nw.ru.

Степан Димитрович Киру, доктор биологических наук, профессор кафедры растениеводства им. И.А. Стебута, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет», Пушкин, Санкт-Петербург, Россия; <https://orcid.org/0000-0002-8648-3837>, SPIN-код: 7524-1395, Author ID: 187300; e-mail: s.kiru53@mail.ru.

Александр Анатольевич Попов, кандидат сельскохозяйственных наук, директор по научно-практической работе ООО «Петербургские Биотехнологии», п. Тярлево, Пушкин, Санкт-Петербург, Россия; <https://orcid.org/0009-0005-1101-0145>, SPIN-код: 2066-9609, AuthorID: 131444; e-mail: info@spb-bio.ru.

Олег Андреевич Горшков, студент магистратуры факультета агротехнологий, почвоведения и экологии, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский государственный аграрный университет", Пушкин, Санкт-Петербург, Россия; лаборант-исследователь отдела генетических ресурсов картофеля, Федеральный исследовательский центр «Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова» (ВИР), Санкт-Петербург, Россия; <https://orcid.org/0009-0004-6135-7975>; e-mail: helge2001@yandex.ru.

Алла Евгеньевна Соловьева, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник отдела биохимии и молекулярной биологии, Федеральный исследовательский центр «Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова» (ВИР), Санкт-Петербург, Россия; <https://orcid.org/0000-0002-6201-4294>, SPIN-код: 1754-4144, Author ID: 597382; e-mail: alsol64@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Elena V. Rogozina, Doc. Sci. (Biol.), Leading Researcher of the Potato Genetic Resources Department, Federal Research Center N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR), St. Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-2743-068X>, SPIN-code: 2407-1201, Author ID: 166172; e-mail: erogozina@vir.nw.ru.

Stepan D. Kiru, Doc. Sci. (Biol.), Professor of the I.A. Stebut Department of Crop Production, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Saint-Petersburg State Agrarian University", Pushkin, St. Petersburg, Russia; <https://orcid.org/0000-0002-8648-3837>, SPIN-code: 7524-1395, Author ID: 187300; e-mail: s.kiru53@mail.ru.

Alexander A. Popov, Cand. Sci. (Agric.), Director of Scientific and Practical Work, St. Petersburg Biotechnologies LLC, Tyarlevo, Pushkin, St. Petersburg, Russia; <https://orcid.org/0009-0005-1101-0145>, SPIN-code: 2066-9609, AuthorID: 131444; e-mail: info@spb-bio.ru.

Oleg A. Gorshkov, graduate student of the Faculty of Agrotechnology, Soil Science and Ecology, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Saint-Petersburg State Agrarian University", Pushkin, St. Petersburg, Russia; laboratory researcher of the Potato Genetic Resources Department, Federal Research Center All-Russian Institute of Plant Genetic Resources named after N.I. Vavilov (VIR), St. Petersburg, Russia; <https://orcid.org/0009-0004-6135-7975>; e-mail: helge2001@yandex.ru.

Alla E. Solovyeva, Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher at the Department of Biochemistry and Molecular Biology, Federal Research Center N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR), St. Petersburg, Russia; <https://orcid.org/0000-0002-6201-4294>, SPIN-code: 1754-4144, Author ID: 597382; e-mail: alsol64@yandex.ru.

Авторский вклад. Все авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении и анализе данного исследования. Все авторы настоящей статьи ознакомились и одобрили представленный окончательный вариант.

Author's contribution. All authors of this research paper have directly participated in the planning, execution, or analysis of this study. All authors of this paper have read and approved the final version submitted.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Received 22.04.2024

Поступила после рецензирования / Revised 15.08.2024

Принята к публикации / Accepted 20.08.2024

Научная статья/Original article

УДК 636.2.082.13


Код ВАК 4.2.5

DOI: 10.24411/2078-1318-2024-3-71-78

ОЦЕНКА ПОЛИМОРФИЗМОВ ЛОКУСА *BoLA-DRB3.2* В ОБРАЗЦАХ КРУПНОГО РОГАТОГО СКОТА РАЗНЫХ ВЕКОВ

А.С. Абдельманова  , Н.В. Бардуков 

Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ им. академика Л.К. Эрнста
пос. Дубровицы, Московская обл., Россия

 abdelmanova@vij.ru

Реферат. В локальных породах крупного рогатого скота закрепились формы генетической изменчивости, способствующие устойчивости или чувствительности к заболеваниям. Ген *BoLA-DRB3* главного комплекса гистосовместимости играет центральную роль в иммунной системе. Существуют генетические варианты локуса *BoLA-DRB3.2*, связанные с устойчивостью или чувствительностью животных к развитию лейкоза и переходу его в стадию персистентного лимфоцитоза. Цель нашей работы состояла в оценке частот встречаемости аллелей локуса *BoLA-DRB3.2*, связанных с устойчивостью к лейкозу, у ярославского скота разных исторических эпох. Были исследованы биологические образцы (ушной выщип, кровь, сперма) современных представителей ярославской породы (YRSL, n=10), а также образцы костных останков крупного рогатого скота XIII-XIV вв., найденные на территории современного Ярославля в ходе археологических раскопок (AR, n=7). Все исследуемые образцы депонированы в генетическом банке ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста. Выполнено секвенирование фрагмента второго экзона локуса *BoLA-DRB3*. В археологических образцах были выявлены только аллели, способствующие чувствительности к лейкозу, в то время как в современных образцах ярославской породы обнаружены как чувствительные, так и устойчивые аллели. Значительная доля аллелей, выявленных в современных образцах, имела нейтральный статус по отношению к лейкозу. Проводимая селекционная работа способствует аллельному разнообразию в данном локусе и насыщению популяции аллелями, связанными с устойчивостью к заболеванию. Однако для более точного анализа эволюции локуса *BoLA-DRB3* необходимо расширение выборки древних и современных образцов.


Ключевые слова: скотоводство, локальные породы, древняя ДНК, *BoLA-DRB3*, устойчивость к лейкозу КРС

Для цитирования. Абдельманова, А.С., Бардуков, Н.В. Оценка полиморфизмов локуса *BoLA-DRB3.2* в образцах крупного рогатого скота разных веков // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2024. – № 3. – С. 71–78. – DOI: 10.24411/2078-1318-2024-3-71-78.

Благодарности и финансирование. Костные остатки крупного рогатого скота из археологических раскопок древнего Ярославля предоставлены сотрудниками Лаборатории естественнонаучных методов ИА РАН к.б.н. с.н.с. Е.Е. Антипиной и к.и.н. с.н.с. Л.В. Яворской в рамках Договора о сотрудничестве между ФГБУН ИА РАН и ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (тема FGGN-2024-0015).

ASSESSMENT OF BOLA-DRB3.2 LOCUS POLYMORPHISMS IN CATTLE SAMPLES OF DIFFERENT CENTURIES

A.S. Abdelmanova  , N.V. Bardukov 

Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member L.K. Ernst
Dubrovitsy, Moscow Region, Russia
 abdelmanova@vij.ru

Abstract. Forms of genetic variation that contribute to resistance or susceptibility to disease have become established in localised cattle breeds. The major histocompatibility complex gene BoLA-DRB3 plays a central role in the immune system. There are genetic variants of the BoLA-DRB3.2 locus associated with the resistance or sensitivity of animals to the development of leukemia and its transition to the stage of persistent lymphocytosis. The aim of our work was to assess the frequency of alleles of the BoLA-DRB3.2 locus associated with resistance to leukemia in Yaroslavl cattle of different historical eras. Biological samples (ear pluck, blood, sperm) of modern animals of the Yaroslavl breed (YRSL, n=10), as well as samples of bone remains of cattle of the 13th-14th centuries, found on the territory of modern Yaroslavl during archaeological excavations (AR, n=7). All studied samples were deposited in the gene bank of the L.K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry. Sequencing of a fragment of the second exon of the BoLA-DRB3 locus was performed. In archaeological samples, only alleles that promote sensitivity to leukemia were identified, while in modern samples of the Yaroslavl breed, both sensitive and resistant alleles were found. A significant proportion of alleles identified in modern samples had a neutral status in relation to leukemia. The breeding work carried out contributes to allelic diversity in this locus and saturation of the population with alleles associated with disease resistance. However, for a more accurate analysis of the evolution of the BoLA-DRB3 locus, it is necessary to expand the sampling of ancient and modern samples.

Keywords: cattle breeding, local cattle breeds, ancient DNA, BoLA-DRB3, resistance to bovine leukemia

For citation. Abdelmanova, A.S., Bardukov, N.V. (2024) 'Assessment of BoLA-DRB3.2 locus polymorphisms in cattle samples of different centuries', *Izvestiya of Saint-Petersburg State Agrarian University*, vol. 77, no. 3, pp. 71–78. (In Russ.) DOI: 10.24411/2078-1318-2024-3-71-78.

Acknowledgements and financial support: Bones of cattle from archaeological excavations of ancient Yaroslavl were provided by the staff of the Laboratory of Natural Science Methods of IA RAS, Ph.D. (Biology), Senior Researcher E.E. Antipina and Ph.D. (History), Senior Researcher L.V. Yavorskaya within the framework of the Agreement on Cooperation between FSBIU IA RAS and L.K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry. The research was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation according to theme No. FGGN-2024-0015.

Введение. В процессе создания и развития локальных пород крупного рогатого скота в их геноме под действием естественного и искусственного отбора закрепились уникальные формы генетической изменчивости, обеспечивающие формирование различных хозяйственно-полезных признаков, связанных не только с продуктивными качествами, но и с показателями здоровья животных, в том числе с устойчивостью или чувствительностью к заболеваниям. Главный комплекс гистосовместимости крупного рогатого скота, известный

как бычий лейкоцитарный антиген (bovine leukocyte antigen, BoLA), включает три гена DRB класса II: DRB1 – псевдоген, DRB2 – транскрибируется на очень низком уровне, BOLA-DRB3 расположен на BTA23 и состоит из 6 экзонов, из которых наиболее полиморфным является второй экзон [1]: на сегодняшний день в базе данных иммунополиморфизма (IPD)-MHC (<https://www.ebi.ac.uk/ipd/mhc/group/BoLA/>) зарегистрировано более 300 аллелей DRB3. Этот ген играет центральную роль в иммунной системе и устойчивости к патогенам и связан с различиями в восприимчивости к инфекционным заболеваниям [2, 3].

Лейкоз крупного рогатого скота – одно из наиболее часто встречающихся инфекционных заболеваний, вызывающих значительные экономические потери, поскольку молоко больных животных запрещено использовать в пищу [4]. Известно, что существуют генетические варианты локуса BoLA-DRB3.2, связанные с устойчивостью или чувствительностью животных к развитию лейкоза и переходу его в стадию персистентного лимфоцитоза [5]. Так, наличие в позициях 70-71 аминокислотной последовательности комбинации ER (глутаминовая кислота и аргинин) способствует устойчивости к лейкозу, в то время как комбинация VDTY(V) в позициях 75-78 способствует чувствительности к лейкозу [6, 7].

Мониторинг существующих стад для типирования аллелей гена BoLA-DRB3.2 является важной задачей. Однако массовая гибридизация с улучшающими породами может затруднить объективную оценку генетической ценности локальных пород в части устойчивости к инфекционным заболеваниям. Существующие на настоящий момент подходы (ПЦР-ПДРФ, аллельспецифическая ПЦР) не позволяют оценить аллельное разнообразие этого локуса в предковых популяциях в связи с сильной деградацией ДНК в археологических образцах. Это делает невозможным сравнительный анализ динамики частот устойчивых/чувствительных аллелей в процессе создания и развития пород.

Цель исследования. Цель нашей работы состояла в оценке частот встречаемости аллелей локуса BoLA-DRB3.2, связанных с устойчивостью к лейкозу, у ярославского скота разных исторических эпох по данным полногеномного секвенирования.

Материалы, методы и объекты исследования. Материалом для исследований служили биологические образцы (ушной выщип, кровь, сперма) современных представителей ярославской породы (YRSL, n=10), а также образцы костных останков крупного рогатого скота XIII-XIV вв., найденные на территории современного Ярославля в ходе археологических раскопок (AR, n=7). Все исследуемые образцы депонированы в генетическом банке ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста.

Исследование археологических образцов проводили в специализированной лаборатории ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста, оборудованной для работы с древней ДНК. Исследование современных образцов проводили на базе ЦКП «Биоресурсы и биоинженерия сельскохозяйственных животных» ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста.

Выполнено полногеномное секвенирование современных и археологических образцов на секвенаторе NovaSeq 6000 (2 x 150 bp), библиотеки были подготовлены с использованием наборов TruSeq DNA Nano Library Prep kit (Illumina) и Accel-NGS® 2S Plus DNA Library Kit (IDT). Биоинформационная обработка данных проводилась в среде R 3.5.0 (<http://www.rproject.org>) с использованием дополнительных пакетов. Выравнивание сиквенсов выполняли с помощью инструментов bwa-mem2 [8] и SAMtools [9] на референсный геном крупного рогатого скота по сборке ARS-UCD1.2. Излучены последовательности фрагмента

второго экзона локуса BoLA-DRB3. Последовательности второго экзона гена BoLA-DRB3 были выравнены в программе Mega 11 и сопоставлены с последовательностями чувствительных (BOLA03100, BOLA03116, BOLA03117, BOLA03122, BOLA03123) и устойчивых (BOLA03102, BOLA03110, BOLA03112, BOLA03113, BOLA03118, BOLA03143, BOLA03144, BOLA03145, BOLA03147, BOLA03148) аллелей, загруженных из базы данных иммунополиморфизма (IPD)-МНС.

Результаты исследования. В ходе исследования был проведен анализ 7 субфосильных (археологических) и 10 современных образцов ярославского скота (рисунок 1). Последовательности ископаемых образцов содержали большое количество пропущенных данных, в связи с чем установить идентификационный номер аллеля по базе данных (IPD)-МНС не представлялось возможным. Однако последовательности нуклеотидов, кодирующих аминокислоты, в позиции 70-80 были доступны, что позволило определить статус аллеля (устойчивый/чувствительный/нейтральный) по отношению к заболеванию лейкозом.

Рисунок 1. Нуклеотидные последовательности фрагмента второго экзона гена BoLA-DRB3: AR – археологические образцы, YRSL – современные образцы, resist – аллели, способствующие устойчивости к лейкозу, suscept – аллели, способствующие восприимчивости к лейкозу; желтой заливкой выделены триплеты, кодирующие аминокислоты в позициях 70-71

Figure 1. Nucleotide sequences of a fragment of the second exon of the BoLA-DRB3 gene: AR – archaeological samples, YRSL – modern samples, resist – alleles of resistance to leukemia, suscept – alleles of susceptibility to leukemia; triplets encoding amino acids in positions 70-71 are highlighted yellow

Были определены генотипы и частоты аллелей для современных и ископаемых образцов ярославского скота (таблица 1).

Таблица 1. Частота встречаемости аллелей BoLA-DRB3.2 в современных и древних популяциях ярославского скота

Table 1. Frequency of BoLA-DRB3.2 alleles in modern and ancient populations of Yaroslavl cattle

Популяция	Кол-во образцов	Частота генотипов, %			Частота аллелей, %		
		R/N	N/N	S/S	R	N	S
AR	7	0	0	100	0	0	100
YRSL	10	40	40	20	20	60	20

Примечание: AR – археологические образцы, YRSL – современные образцы, R – устойчивые к лейкозу аллели, S – чувствительные к лейкозу аллели, N – нейтральные аллели.

Note: R – resistant to leukemia alleles, S – susceptible to leukemia alleles, N – neutral alleles, AR – archaeological samples, YRSL – modern samples.

Как видно из таблицы 1, в археологических образцах были выявлены только аллели, способствующие чувствительности к лейкозу, в то время как в современных образцах ярославской породы обнаружены как чувствительные, так и устойчивые аллели. Значительная доля аллелей, выявленных в современных образцах, имела нейтральный статус по отношению к лейкозу.

Стоит отметить, что 4 современных образца несли гетерозиготный генотип по устойчивому аллелю, а 2 особи были гомозиготны по чувствительному аллелю. Наблюдаемый результат может объясняться тем фактом, что вирус лейкоза впервые был описан только в 1871 г. [10], его распространение связано с интенсификацией животноводства и обменом скотом. Вероятно, ископаемые животные не сталкивались с вирусом и не выработали механизмов устойчивости. В то же время присутствие в выборке современных образцов гомозиготных по чувствительным аллелям животных может объясняться селекционной работой, направленной на повышение продуктивности. Проведенные ранее исследования показали неоднозначную связь между носительством аллелей устойчивости и хозяйственно-полезными признаками. А.А. Сермягин с соавторами установили, что у быков, гомозиготных по чувствительному аллелю, племенная ценность по удою за 305 дней лактации и выходу молочного белка достоверно выше, чем у животных с другими возможными генотипами [11]. Ранее была выявлена положительная корреляция между носительством аллелей устойчивости и повышенной молочной продуктивностью [12]. Н.В. Ковалюк с соавторами установили, что присутствие в генотипе быков-производителей аллелей чувствительности к лейкозу в гомозиготной форме (SS) связано со снижением индекса фертильности и коэффициента стельности дочерей [13].

Выводы. В современной ярославской породе наблюдаются как аллели, связанные с чувствительностью, так и аллели, способствующие устойчивости к лейкозу крупного рогатого скота. В то же время в археологических образцах выявлены только аллели, связанные с повышенной восприимчивостью к лейкозу. Результаты исследования показали, что проводимая селекционная работа способствует повышению аллельного разнообразия в

данном локусе и насыщению популяции аллелями, связанными с устойчивостью к заболеванию. Расширение выборки современных и древних образцов может дать более полное понимание эволюции локуса BoLA-DRB3, однако в этом случае полногеномное секвенирование не может служить оптимальным методом исследования в связи с высокой стоимостью. Перспективным подходом может являться разработка тест-систем, направленных на амплификацию коротких целевых фрагментов с последующим секвенированием по Сэнгеру.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kompetitive Allele Specific PCR Genotyping of 89 SNPs in Romanian Spotted and Romanian Brown Cattle Breeds and Their Association with Clinical Mastitis / Ilie D.E. et al. // *Animals*. – 2023. – Vol. 13(9). – P. 1484, DOI: 10.3390/ani13091484.
2. BoLA-DRB3 Polymorphism is Associated with Differential Susceptibility to Bovine Leukemia Virus-Induced Lymphoma and Proviral Load / Lo C.W. et al. // *Viruses*. – 2020. – Vol. 12(3). – P. 352. – DOI: 10.3390/v12030352.
3. Major Histocompatibility Complex Class II (DRB3) Genetic Diversity in Spanish Morucha and Colombian Normande Cattle Compared to Taurine and Zebu Populations / Bohórquez M.D. // *Front. Genet.* – 2020. – Vol. 10. – P. 1293, DOI: 10.3389/fgene.2019.01293.
4. Гильманов, Х.Х., Тюлькин, С.В., Бигаева, А.В. Влияние лейкоза крупного рогатого скота на безопасность и качество молока и молочной продукции // *Актуальные вопросы индустрии напитков*. – 2019. – № 3. – С. 60-64, DOI: 10.21323/978-5-6043128-4-1-2019-3-60-64.
5. Identification of BoLA Alleles Associated with BLV Proviral Load in US Beef Cows / C. H. LaHuis et al. // *Pathogens*, 2022, vol. 11(10), p. 1093, DOI: 10.3390/pathogens11101093.
6. Генетические механизмы устойчивости и чувствительности к лейкозу у айрширской и черно-пестрой пород крупного рогатого скота, установленные на основе распределения аллелей гена BoLA-DRB3 / И. Г. Удина // *Генетика*. – 2003. – Т. 39. – № 3. – С. 383–396.
7. Relationship between Allelic Heterozygosity in BoLA-DRB3 and Proviral Loads in Bovine Leukemia Virus-Infected Cattle / Daous H.E. et al. // *Animals (Basel)*. – 2021. – Vol. 11(3). – P. 647. – DOI: 10.3390/ani11030647.
8. Vasimuddin M., Misra S., Li H., Aluru S. Efficient Architecture-Aware Acceleration of BWA-MEM for Multicore Systems // *IEEE Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS)*. – 2019. – DOI: 10.1109/IPDPS.2019.00041.
9. Twelve years of SAMtools and BCFtools / P. Danecek et al. // *Gigascience*. – 2021. – Vol. 10(2). – P. giab008, DOI: 10.1093/gigascience/giab008 (accessed: 14.01.2024).
10. Лейкоз крупного рогатого скота – диагностика, оздоровление, антропозоонозный потенциал (история вопроса) / И. М. Донник [и др.] // *Сельскохозяйственная биология*. – 2021. – Т. 56. – № 2. – С. 230–244. – DOI: 10.15389/agrobiology.2021.2.230rus.
11. Связь генотипов BoLA-DRB3 с племенной ценностью по показателям молочной продуктивности в российской популяции молочного скота. / А. А. Сермягин и др. // *Сельскохозяйственная биология*. – 2016. – Т. 51. – № 6. – С. 775–781. – DOI: 10.15389/agrobiology.2016.6.775rus.
12. Молочная продуктивность коров в зависимости от инфицированности вирусом лейкоза и генотипа по BoLA-DRB3 / Е. А. Гладырь и др. // *Достижения науки и техники АПК*. – 2012. – № 8. – С. 46–49.
13. Ковалюк, Н.В., Юницкая, В.В. Влияние BoLA-DRB3 генотипа на оценку молочной продуктивности голштинских быков // *Сб. научн. тр. Краснодарского научного центра по зоотехнии и ветеринарии*. – 2020. – Т. 9. – № 1. – С. 31-33, DOI: 10.34617/8zjw-0098.

REFERENCES

1. Ilie, D.E. et al. (2023) 'Kompetitive Allele Specific PCR Genotyping of 89 SNPs in Romanian Spotted and Romanian Brown Cattle Breeds and Their Association with Clinical Mastitis', *Animals*, vol. 13, no. 9, p. 1484. DOI: 10.3390/ani13091484.
2. Lo, C.-W. et al. (2020) 'BoLA-DRB3 Polymorphism is Associated with Differential Susceptibility to Bovine Leukemia Virus-Induced Lymphoma and Proviral Load', *Viruses*, vol. 12 No. 3, p. 352. DOI: 10.3390/v12030352.
3. Bohórquez, M.D. et al. (2020) 'Major Histocompatibility Complex Class II (DRB3) Genetic Diversity in Spanish Morucha and Colombian Normande Cattle Compared to Taurine and Zebu Populations', *Frontiers in Genetics*, vol. 10, p. 1293. DOI: 10.3389/fgene.2019.01293.
4. Gilmanov, Kh. Kh., Tyulkin, S. V., Bigaeva, A. V. (2019) 'The influence of cattle leukemia on the safety and quality of milk and dairy products', *Current issues in the beverage industry*, no. 3, pp. 60–64. DOI: 10.21323/978-5-6043128-4-1-2019-3-60-64.
5. LaHuis, C.H. et al. (2022) 'Identification of BoLA Alleles Associated with BLV Proviral Load in US Beef Cows', *Pathogens*, vol. 11, no. 10, p. 1093. DOI: 10.3390/pathogens11101093.
6. Udina, I.G. et al. (2003) 'Genetic mechanisms of resistance and sensitivity to leukemia in Ayrshire and black-and-white breeds of cattle, established on the basis of the distribution of BoLA-DRB3 gene alleles', *Genetics*, vol. 39, no. 3, pp. 383–396.
7. Daous, H.E. et al. (2021) 'Relationship between Allelic Heterozygosity in BoLA-DRB3 and Proviral Loads in Bovine Leukemia Virus-Infected Cattle', *Animals*, vol. 11 No. 3, p. 647, DOI: 10.3390/ani11030647.
8. Vasimuddin, Md., Misra, S., Li, H. and Aluru, S. (2019) 'Efficient Architecture-Aware Acceleration of BWA-MEM for Multicore Systems', *2019 IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS)*, presented at the 2019 IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS), IEEE, Rio de Janeiro, Brazil, pp. 314–324, DOI: 10.1109/IPDPS.2019.00041.
9. Danecek, P. et al. (2021) 'Twelve years of SAMtools and BCFtools', *GigaScience*, vol. 10, no. 2, p. giab008, DOI: 10.1093/gigascience/giab008.
10. Donnik, I.M. et al. (2021) 'Bovine leukemia virus infection – diagnostics, eradication, and anthroozoonotic potential (background)', *Agricultural Biology*, vol. 56, no. 2, pp. 230–244. DOI: 10.15389/agrobiol.2021.2.230eng.
11. Sermyagin, A.A. et al. (2016) 'Associations of BOLA-DRB3 genotypes with breeding values for milk production traits in Russian dairy cattle population', *Sel'skokhozyaistvennaya Biologiya [Agricultural Biology]*, vol. 51, no. 6, pp. 775-781. DOI: 10.15389/agrobiol.2016.6.775eng.
12. Gladyr, E.A. et al. (2012) 'Milk productivity of cows depending on infection with leukemia virus and BoLA-DRB3 genotype', *Achievements of science and technology of the agro-industrial complex*, no. 8, pp. 46-49.
13. Kovalyuk, N.V., Yunitskaya, V.V. (2020) 'The influence of the BoLA-DRB3 genotype on the assessment of milk productivity of Holstein bulls', *Collection of scientific papers of the Krasnodar Scientific Center for Animal Science and Veterinary Medicine*, vol. 9, no. 1, pp. 31–33. DOI: 10.34617/8zjw-0098.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Александра Сергеевна Абдельманова, доктор биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории функциональной и эволюционной геномики животных, Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика Л.К. Эрнста, п. Дубровицы, Московская обл., Россия; <https://orcid.org/0000-0003-4752-0727>, SPIN-код: 9320-8756; e-mail: abdelmanova@vij.ru.

Николай Владимирович Бардуков, научный сотрудник лаборатории генетических технологий в агро- и аквахозяйстве, Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика Л.К. Эрнста, п. Дубровицы, Московская обл., Россия; <http://orcid.org/0000-0002-5497-2409>, SPIN-код: 1653-3383; e-mail: bardukv-nikolajj@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexandra S. Abdelmanova, Doc. Sci. (Biol.), Senior Researcher, Laboratory of Functional and Evolutionary Animal Genomics, L.K. Ernst Federal Science Center for Animal Husbandry, Dubrovitsy, Moscow Region, Russia; <https://orcid.org/0000-0003-4752-0727>, SPIN-code: 9320-8756; e-mail: abdelmanova@vij.ru.

Nikolay V. Bardukov, Researcher at the laboratory of genetic technologies in agro- and aquaculture, L.K. Ernst Federal Science Center for Animal Husbandry, Dubrovitsy, Moscow Region, Russia; <http://orcid.org/0000-0002-5497-2409>, SPIN-code: 1653-3383; e-mail: bardukv-nikolajj@mail.ru.

Авторский вклад. Все авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении и анализе данного исследования. Все авторы настоящей статьи ознакомились и одобрили представленный окончательный вариант.

Author's contribution. All authors of this research paper have directly participated in the planning, execution, or analysis of this study. All authors of this paper have read and approved the final version submitted.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Received 24.06.2024
Поступила после рецензирования / Revised 15.08.2024
Принята к публикации / Accepted 20.08.2024

Научная статья/Original article


УДК 636.082

Код ВАК 4.2.5

DOI: 10.24411/2078-1318-2024-3-79-88

ИЗМЕНЕНИЕ АБСОЛЮТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ И ОЦЕНКИ МЕТОДОМ BLUP ПРИЗНАКОВ МОЛОЧНОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ КОРОВ ЧЕРНО-ПЕСТРОЙ ПОРОДЫ

О.К. Васильева  

Всероссийский научно-исследовательский институт генетики и разведения сельскохозяйственных животных – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика Л. К. Эрнста»,
пос. Тярлево, г. Санкт-Петербург, Россия
 vaciola@mail.ru

Реферат. В статье представлен анализ динамики абсолютных показателей и племенной оценки (EBV) методом BLUP AM признаков молочной продуктивности. Объектом исследований являлись коровы черно-пестрой породы, закончившие первую лактацию в период с 1991 по 2022 гг. в Республике Башкортостан (15 хозяйств, 18270 голов). В среднем по выборке удой первотелок составил $5192 \pm 8,6$ кг молока с содержанием жира $3,81 \pm 0,001\%$ и белка $3,10 \pm 0,001\%$, оценка EBV по удою $+2,15 \pm 0,44$ кг. Удой первотелок по отдельным хозяйствам варьировал от 4758 до 6196 кг молока при изменении EBV от -23 до +24 кг. Проведены расчет и анализ селекционно-генетических параметров хозяйственно полезных признаков. В связи с изменяющимися условиями эксплуатации животных на протяжении нескольких поколений наблюдается невысокая наследуемость удоя, молочного жира и белка на уровне 0,143-0,157 и низкая по процентному содержанию жира и белка 0,022 и 0,011. По поколениям удой повысился с 3497 (I) до 5859 кг молока (VI), содержание жира в молоке – с 3,66 % (III) до 3,89 % (VI), содержание белка – с 3,08 % (IV) до 3,13 % (VI). Выход молочного жира и молочного белка стабильно увеличивался из поколения в поколение на +94,4 и +75,2 кг. За счет использования быков с различной племенной ценностью на маточном поголовье разных поколений оценка EBV по удою варьировала от -9,89 кг (I) до +11,02 кг (III). Полученные в ходе исследования результаты изменений абсолютных показателей и племенной ценности по молочной продуктивности коров-первотелок свидетельствуют об улучшении менеджмента в хозяйствах Республики Башкортостан и росте генетического потенциала маточного поголовья исследуемых стад черно-пестрого скота.


Ключевые слова: черно-пестрая порода, молочная продуктивность, BLUP AM, EBV, наследуемость, генетическая корреляция, фенотипическая корреляция

Для цитирования: Васильева, О.К. Изменение абсолютных показателей и оценки методом BLUP признаков молочной продуктивности коров черно-пестрой породы // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2024. – № 3 (77). – С. 79–88. – DOI: 10.24411/2078-1318-2024-3-79-88.

Финансирование. Работа проведена в рамках выполнения научных исследований Министерства науки и высшего образования РФ по теме № 124020200029-4. В исследованиях использованы материалы Селекционного центра по черно-пестрой породе (ВНИИГРЖ).

CHANGES IN ABSOLUTE INDICATORS AND ASSESSMENT BY THE BLUP METHOD OF MILK PRODUCTIVITY TRAITS OF BLACK AND WHITE COWS

O.K. Vasileva  

Russian Research Institute of Farm Animal Genetics and Breeding – Branch of the L.K. Ernst
Federal Research Center for Animal Husbandry
v. Tyarlevo, Saint Petersburg, Russia
vaciola@mail.ru

Abstract. The article presents the analysis of dynamics of absolute indices and breeding evaluation (EBV) by BLUP AM method of milk productivity traits. The object of the research was Black-and-White cows that completed their first lactation in the period from 1991 to 2022 in the Republic of Bashkortostan (15 farms, 18,270 heads). The average milk yield of the first heifers in the sample was 5192 ± 8.6 kg of milk with fat content of $3.81 \pm 0.001\%$ and protein content of $3.10 \pm 0.001\%$, EBV score on milk yield was $+2.15 \pm 0.44$ kg. The milk yield of first-calf heifers on individual farms varied from 4758 to 6196 kg of milk, with EBV varying from -23 to +24 kg. Calculation and analysis of selection and genetic parameters of economically useful traits were carried out. Due to the changing operating conditions of animals over several generations, low heritability of milk yield, milk fat and protein is observed at the level of 0.143-0.157 and low in the percentage of fat and protein – 0.022 and 0.011. By generation, milk yield increased from 3497 (I) to 5859 kg of milk (VI), fat content in milk – from 3.66% (III) to 3.89% (VI), protein content – from 3.08% (IV) up to 3.13% (VI). The yield of milk fat and milk protein increased steadily from generation to generation by +94.4 and +75.2 kg. Due to the use of bulls with different breeding values on breeding stock of different generations, the EBV estimate for milk yield varied from -9.89 kg (I) to +11.02 kg (III). The results of changes in absolute indicators and breeding value for the milk productivity of first-calf heifers obtained during the study indicate an improvement in management in the farms of the Republic of Bashkortostan and an increase in the genetic potential of the breeding stock of the studied herds of Black-and-White cattle.

Keywords: Black and White breed, dairy productivity, BLUP AM, EBV, heritability, genetic correlation, phenotypic correlation

For citation: Vasileva, O.K. (2024) ‘Changes in absolute indicators and assessment by the BLUP method of milk productivity traits of black and white cows’, *Izvestya of Saint-Petersburg State Agrarian University*, vol. 77, no. 3, pp. 79–88. (In Russ.) DOI: 10.24411/2078-1318-2024-3-79-88.

Financial support. The study was funded by scientific research of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation on the topic no. 124020200029-4. The research used materials from the Black and white Breeding Center (RRIFAGB).

Введение. Черно-пестрая порода крупного рогатого скота до недавнего времени была ведущей в России [1-3]. Однако в последние годы путем поглотительного скрещивания большинство стад переведено в голштинскую породу. По результатам породной инвентаризации скота, проводимой в соответствии с методикой ЕЭК по определению породы (породности), относительная численность скота черно-пестрой породы в 2022 г. сократилась на 17,1% по сравнению с предыдущим годом и составила 25,25 %, тогда как в 2010 г. их доля была равна 57,92 %. За этот период молочная продуктивность увеличилась на 2082 кг молока (с 5177 до 7259 кг), при этом содержание жира в молоке – на 0,09 % (с 3,81 до 3,90 %) и белка

– на 0,08 % (с 3,12 до 3,20 %). Современную популяцию черно-пестрого скота разводят во многих регионах РФ, одним из которых является Республика Башкортостан, где в 2022 г. насчитывалось 66,34 тыс. голов крупного рогатого скота черно-пестрой породы, в том числе коров 32,96 тыс. голов [4]. Молочная продуктивность коров черно-пестрой породы в племенных хозяйствах Республики Башкортостан в 2022 году составила 7038 кг молока, с содержанием жира 3,96 % и белка 3,16 %, при увеличении за 12 лет на 1599 кг, 0,15 и 0,05 % соответственно.

Сдерживающим фактором развития отечественной популяции черно-пестрого скота является ограниченное поголовье живых быков-производителей собственной репродукции, обладающих высоким генетическим потенциалом по продуктивности [1; 4].

На современной популяции черно-пестрого скота изучаются не только фенотипические показатели молочной продуктивности и их селекционно-генетические параметры, но и геном животных, проводится оценка племенной ценности с использованием метода BLUP [5-8]. Применение модели BLUP Animal Model позволяет эффективно использовать данные зоотехнического и племенного учета для расчета и контроля селекционно-генетических параметров животных, при этом возрастает точность прогноза их оценки ПЦ, что ведет к селекционному прогрессу в популяции [8; 9].

В связи с резким сокращением популяции черно-пестрого скота и ростом продуктивности коров в Республике Башкортостан исследования изменений оценки генетической ценности животных черно-пестрой породы на основе их фенотипических показателей в этом регионе является актуальными.

Цель исследования – анализ динамики абсолютных показателей и племенная оценка методом BLUP признаков молочной продуктивности маточного поголовья черно-пестрого скота в Республике Башкортостан.

Материалы, методы и объекты исследования. Исследования проведены на массиве данных по признакам молочной продуктивности 18270 коров-первотелок черно-пестрой породы, закончивших лактацию в период с 1991 по 2022 гг. Выборка сформирована из данных базы «Селэкс» 15 хозяйств Республики Башкортостан, верифицированных с использованием баз данных «Картотека быков черно-пестрой породы КРС» и «Картотека матерей быков черно-пестрой породы КРС» в компьютерной программе «СГС-ВНИИГРЖ» [10].

Подготовка информации по фенотипам животных, исключение недостоверных данных, пропущенных значений, оценка описательных и частотных статистик проведена в программах MS Excel и RStudio. Вариансы и ковариансы оценивали методом ограниченного максимального правдоподобия (Restricted Maximum Likelihood Estimation, REML) на основе множественных итераций с использованием модуля RENUMF90. Оценки племенной ценности первотелок EBV (Estimation Breeding Value) рассчитывали с помощью программы семейства BLUPF90 [11].

Используемая модель оценки BLUP ANIMAL MODEL имела вид:

$$Y_{ijk} = p + HYS_i + bAFC_k + Animal_k + e_{ijk},$$

где Y_{ijk} – результирующий показатель (удой, процентное содержание жира и белка, количество молочного жира и белка, живая масса после первого отела, межотельный период) k -й первотелки, дочери j -го быка, лактировавшей в i -ой градации «стадо – год – сезон»;

p – популяционная константа;

NYS_i – фиксированный фактор i -й градации: N – племенной завод или племрепродуктор содержания животного;

Y – календарный год отела коровы;

S – кварталный сезон отела коровы;

b – коэффициент линейной регрессии результирующего фактора на возраст первого отела;

$AFCK$ – возраст 1-го отела k -ой коровы (мес.);

$Animal_k$ – рандомизированный эффект животного;

e_{ijk} – остаточный эффект модели, связанный с влиянием факторов, не учтенных в уравнении оценки.

Точность прогноза или надежность оценки животного (reliability, REL) рассчитывали по формуле

$$REL = 1 - (PEV_i / \sigma_a^2),$$

где PEV (Prediction Error Variance) – прогнозируемая ошибка дисперсии или доля аддитивной генетической вариации, не учитываемая прогнозом;

σ_a^2 – аддитивная генетическая дисперсия.

Коэффициент наследуемости вычисляли с применением дисперсионного анализа по уравнению:

$$h^2 = \frac{VarA}{VarA + VarPE + VarE},$$

где $VarA$ – аддитивная генетическая дисперсия,

$VarPE$ – дисперсия постоянно действующих факторов среды,

$VarE$ – остаточная дисперсия ошибки.

Результаты исследования. В среднем по выборке животных удои по первой лактации составил $5192 \pm 8,6$ кг молока с процентным содержанием жира $3,81 \pm 0,001\%$ и белка $3,10 \pm 0,001\%$ при выходе молочного жира $198,2 \pm 0,3$ кг и белка $161,3 \pm 0,3$ кг (таблица 1).

Таблица 1. Селекционно-генетические параметры признаков молочной продуктивности коров первого отела черно-пестрой породы (n=18270)

Table 1. Breeding and genetic parameters of milk productivity traits of first calving cows of the Black-and-White breed (n=18270)

Показатели	M	m	σ	Cv, %	min	max	EBV	REL
Удой за 305 дн., кг	5192	8,6	1165	22,4	2029	14840	2,15	0,21
МДЖ, %	3,81	0,001	0,19	4,9	2,24	5,50	-0,002	0,22
Молочный жир, кг	198,2	0,3	47,2	23,8	72,1	566,9	0,012	0,20
МДБ, %	3,10	0,001	0,11	3,5	2,39	4,70	-0,0003	0,15
Молочный белок, кг	161,3	0,3	37,3	23,1	58,9	476,4	0,058	0,20
Живая масса, кг	488	0,3	47	9,6	324	800	-0,036	0,25
МОП, дней	383	0,4	60	15,8	267	657	0,12	0,08

Коэффициент изменчивости уровня удоя имеет повышенное значение 22,4%, что определяется большим временным периодом исследования. Вариабельность качественных

показателей молока низкая (4,9 % по жиру и 3,5 % по белку). Оценка EBV, рассчитанная с использованием выбранной модели BLUP AM, в среднем по выборке составила по удою $+2,15 \pm 0,44$ кг, по содержанию жира – $0,002 \pm 0,0001\%$, по содержанию белка $0,0003 \pm 0,0002\%$ с достоверностью 0,21, 0,22 и 0,15 соответственно.

В ходе исследований выявлены фенотипические и генетические взаимосвязи признаков молочной продуктивности, а также рассчитаны коэффициенты наследуемости (таблица 2).

Таблица 2. Коэффициенты наследуемости и корреляции признаков молочной продуктивности первотелок черно-пестрой породы (n=18270) *
Table 2. Heritability coefficients and correlations of milk productivity traits in first-calf heifers of the Black-and-White breed (n=18270)

Показатели	Удой за 305 дн., кг	МДЖ, %	Молочный жир, кг	МДБ, %	Молочный белок, кг	Живая масса, кг	МОП, дней
Удой за 305 дн., кг	0,157	0,113	0,962	-0,021	0,982	-0,022	0,014
МДЖ, %	0,172	0,022	0,369	0,174	0,139	-0,017	-0,007
Молочный жир, кг	0,979	0,362	0,154	0,017	0,952	-0,028	0,011
МДБ, %	0,103	0,188	0,137	0,011	0,150	-0,043	0,003
Молочный белок, кг	0,988	0,196	0,973	0,250	0,143	-0,032	0,012
Живая масса, кг	0,362	0,228	0,383	-0,099	0,336	0,116	-0,031
МОП, дней	0,060	0,094	0,077	-0,071	0,047	0,010	0,072

Примечание: по диагонали – коэффициент наследуемости h^2 , выше диагонали – коэффициент генетической корреляции r_g , ниже диагонали – коэффициент фенотипической корреляции r_p .

Наследуемость удоя, молочного жира и белка невысокая и находится на уровне 0,143-0,157, а по процентному содержанию жира и белка наблюдается низкая наследуемость 0,022 и 0,011, что объяснимо изменяющимися условиями эксплуатации животных на протяжении нескольких поколений.

Фенотипическая взаимосвязь удоя и содержания жира, удоя и содержания белка в молоке положительная, составляет $+0,172$ и $+0,103$, а между качественными показателями $+0,188$. Коэффициенты генотипической корреляции несколько ниже и между удоем и содержанием жира он равен 0,113, а между удоем и содержанием белка имеет низкое отрицательное значение $-0,021$. Генотипическая изменчивость качественных показателей молока близка к фенотипической ($+0,174$ против $+0,188$). Это можно объяснить изменением коррелятивных признаков в одном направлении (увеличение) на протяжении длительного периода исследований.

На рисунке 1 показано изменение как абсолютных показателей, так и оценки молочной продуктивности первотелок по отдельным хозяйствам. Удой первотелок варьировал от 4758 до 6196 кг молока при изменении EBV от -23 до $+24$ кг. Одинаковая высокая оценка удоя ($+24$ кг молока) наблюдается в стадах 5 и 11, где средняя молочная продуктивность первотелок составляет 5004 и 5320 кг молока. Коровы этих стад являются дочерями 72 и 58 быков

соответственно, из которых 64,2 и 63,0 % имеют положительную оценку по удою. На данный показатель оказывает влияние использование быков с улучшающим эффектом его дочерей.

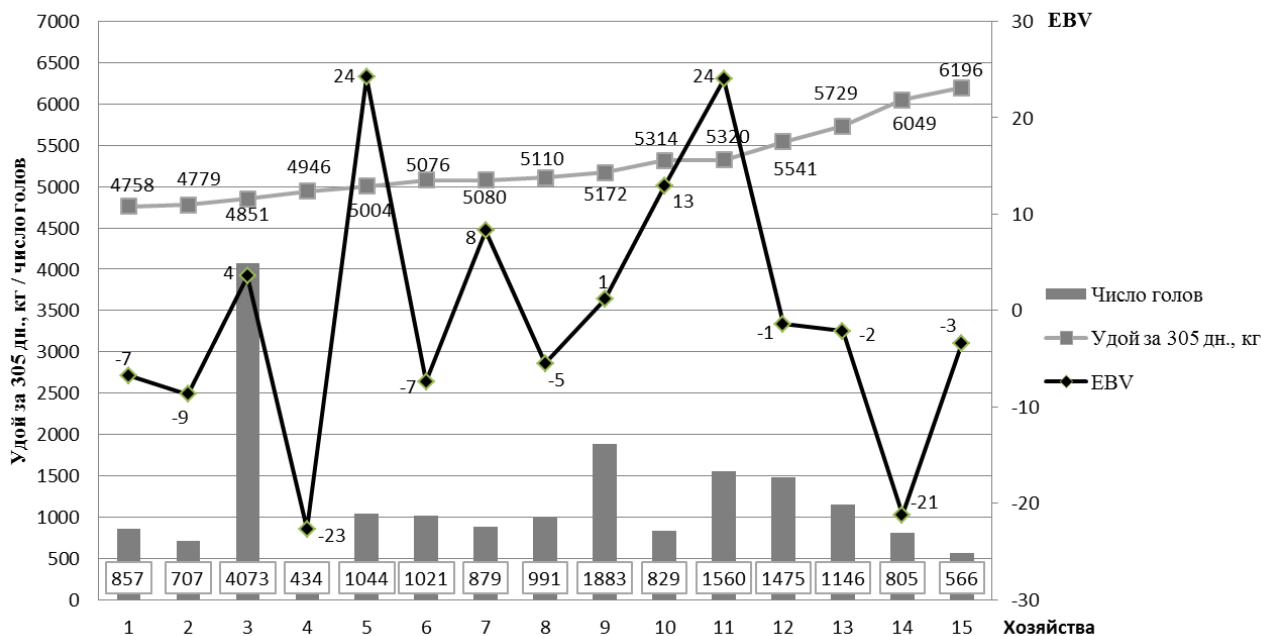


Рисунок 1. Изменение абсолютных показателей и племенной ценности по удою коров-первотелок по отдельным стадам

Picture 1. Changes in absolute indicators and breeding value for milk yield of first-calf heifers in individual herds

Так, в стаде 5 у 10 быков и в стаде 11 у 12 быков большая часть потомков с положительной оценкой по удою, в том числе имеют положительную оценку в первом хозяйстве все дочери быков Дуплета 10101 ($n = 70$), Жеста 1401 ($n = 118$), Маркета 3261 ($n = 11$), Санрея 4109204856 ($n = 75$), Стромю 463041 ($n = 30$), Дончака 8721 ($n = 35$), а во втором хозяйстве всего двух таких быков – Ромиса 133 ($n = 29$) и Мустанга 303515771 ($n = 13$). Следует отметить, что производитель Никотин 624 улучшил молочную продуктивность дочерей в обоих стадах.

Более низкая отрицательная оценка по удою наблюдается как в стаде 4 с низким средним удоем 4946 кг молока, так и в стаде 14 с высокой молочной продуктивностью 6049 кг молока (EBV -23 и -21 кг молока соответственно). В данных хозяйствах 67,5 и 67,6 % животных имеют отрицательную оценку по удою. Следует отметить, что большинство дочерей у таких быков, как Демон 1355, Набат 209, Янаул 4909, в обоих стадах уступают сверстницам по удою.

Абсолютный уровень удою и EBV по этому признаку в конкретных хозяйствах зависит от их показателей во временном аспекте. Поэтому далее проведен анализ изменения молочной продуктивности и ее оценки по годам лактирования первотелок.

Динамика изменения абсолютных показателей и племенной ценности по удою первотелок по годам представлена на рисунке 2. Наблюдается рост продуктивности первотелок с 3648 кг молока в 2001 г. до 6012 кг в 2021 г. при увеличении количества животных, вошедших в анализируемую выборку, с 268 до 1484 голов. Средний уровень оценок

EBV удоя по годам варьировала от высоких +32 и +24 кг молока в 2003 и 2004 гг. при абсолютном удое 3848 и 4291 кг до низких -14 и -13 кг молока в 2012 и 2013 гг. при удое от 4765 и 4949 кг. Различия в оценке удоя по годам объясняются использованием разных по качеству быков-производителей.

В выборку 2003-2004 гг. вошли дочери 48 быков, из которых 74,3 % имели положительную оценку по удою. В 2012-2013 гг. 65,2 % первотелок имели отрицательную оценку по удою. В этот период лактировали дочери 98 быков, из которых 18,4 % производителей с наибольшим количеством дочерей (более 10 голов) оказали отрицательное влияние на их молочную продуктивность.

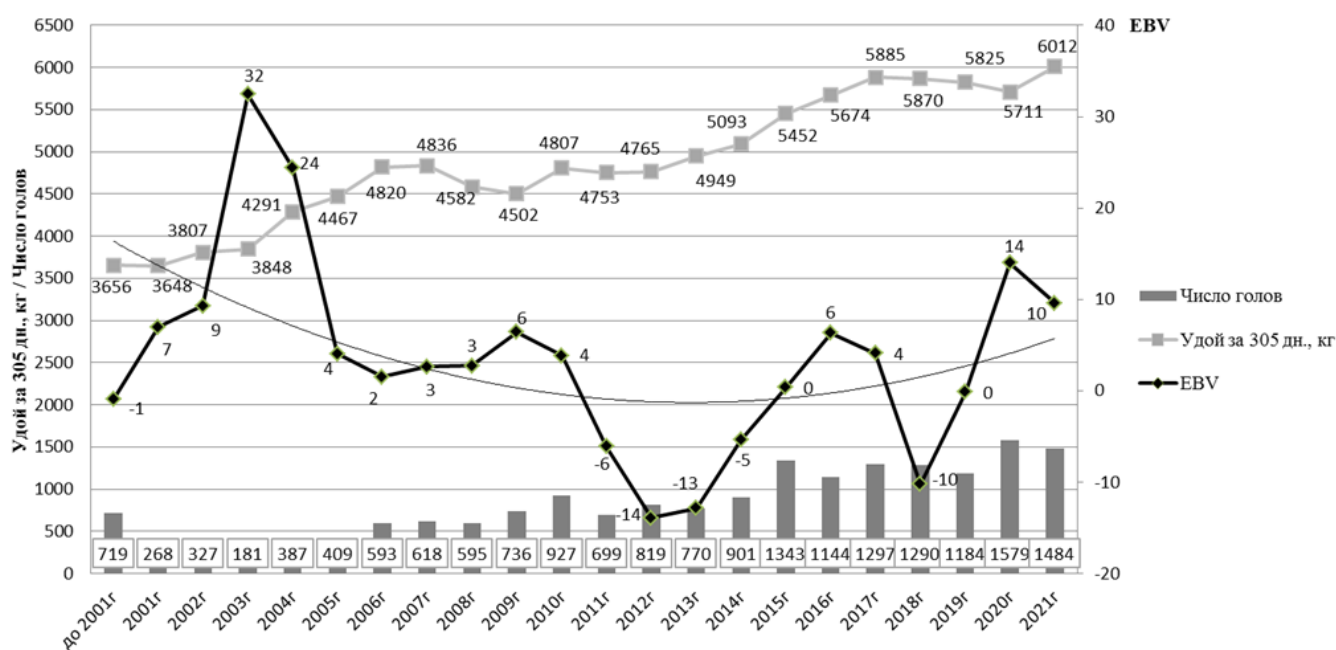


Рисунок 2. Динамика абсолютных показателей и племенной ценности по удою коров-первотелок по годам

Picture 2. Dynamics of absolute indicators and breeding value for milk yield of first-calf heifers by year

Так как в молочном скотоводстве поколение животных считается равным 5 годам, то дальнейшие исследования по изучению изменения абсолютных показателей и племенной ценности молочной продуктивности первотелок проведены в рамках последних 6 поколений.

Из данных таблицы 3 видно, что по поколениям наблюдается не только рост показателей молочной продуктивности: удой повысился с 3497 (I пок.) до 5859 кг молока (VI пок.), но и улучшились качественные показатели молока: содержание жира в молоке – с 3,66 % (III пок.) до 3,89 % (VI пок.), содержание белка – с 3,08 % (IV пок.) до 3,13 % (VI пок.). Следует отметить, что выход молочного жира и молочного белка стабильно увеличивается из поколения в поколение на +94,4 кг при росте от 133,3 до 227,7 кг в первом случае и на +75,2 кг при росте от 108,4 до 183,6 кг во втором. Суммарный прирост молочного жира и белка за исследуемые поколения составил +169,6 кг или 28,3 кг за поколение. При этом живая масса коров после 1 отела увеличилась с 411 кг (II пок.) до 510 кг (VI пок.). Оценка EBV по удою по поколениям варьировала от -9,89 кг (I пок.) до +11,02 кг (III пок.), а в VI поколении она равна

+4,14 кг молока. Вариабельность данного показателя объясняется использованием быков на маточном поголовье разных поколений исследуемой выборки животных с различными оценками племенной ценности.

Таблица 3. Изменение показателей молочной продуктивности и их племенной ценности по поколениям

Table 3. Changes in milk productivity indicators and breeding value by generation

Показатель / EBV	Поколение / Годы					
	I 1992-1996	II 1997-2001	III 2002-2006	IV 2007-2011	V 2012-2016	VI 2017-2021
Число голов	198	776	1897	3575	4977	6834
Удой за 305 дн., кг	3497 -9,89	3704 3,95	4368 11,02	4701 2,04	5247 -3,70	5859 4,14
МДЖ,%	3,81 -0,001	3,69 0,002	3,66 -0,002	3,75 0,000	3,82 -0,004	3,89 -0,002
Молочный жир, кг	133,3 -0,36	136,9 0,22	160,0 0,37	176,2 0,10	200,2 -0,35	227,7 0,11
МДБ,%	3,10 0,001	3,10 0,001	3,09 0,001	3,08 0,000	3,09 -0,001	3,13 0,000
Молочный белок, кг	108,4 -0,23	114,8 0,15	134,7 0,35	144,9 0,06	162,2 -0,15	183,6 0,13
Живая масса, кг	423 0,39	411 -0,90	447 -0,69	471 -0,07	501 0,32	510 -0,01
МОП, дн.	382 0,03	399 -0,11	384 0,04	385 0,15	377 -0,08	385 0,31

Рост абсолютного уровня удоя первотелок свидетельствует об улучшении менеджмента в хозяйствах исследуемой популяции, а вариабельность EBV по удою свидетельствует о росте генетического потенциала маточного поголовья региональной популяции черно-пестрого скота Республики Башкортостан.

Выводы. В результате проведенных исследований выявлено, что по отдельным хозяйствам удой первотелок варьировал от 4758 до 6196 кг молока при изменении EBV от -23 до +24 кг. Высокие или низкие оценки EBV по молочной продуктивности зависят от племенной ценности быков-производителей, работающих на маточном поголовье этих стад. Уровень племенной ценности животных определяется не только абсолютными показателями удоя, но и другими факторами, прописанными в модели оценки BLUP AM. Изменения абсолютных показателей и племенной ценности по молочной продуктивности коров-первотелок свидетельствуют об улучшении менеджмента в хозяйствах Республики Башкортостан и росте генетического потенциала маточного поголовья исследуемых стад черно-пестрого скота. Об этом свидетельствует тот факт, что за последние 6 поколений выход молочного жира и молочного белка увеличился на +94,4 и на +75,2 кг соответственно, а в сумме прирост составил +169,6 кг или 28,3 кг за поколение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Динамика изменения основных показателей в популяции черно-пестрого скота Российской Федерации / С. Н. Харитонов [и др.] // Молочное и мясное скотоводство. – 2018. – № 7. – С. 13-17.

2. Севостьянов, М.Ю., Лиходеевская, О.Е., Горелик, О.В. Селекционные параметры основных хозяйственно полезных признаков молочной продуктивности коров уральского типа черно-пестрой породы // Генетика и разведение животных. – 2020. – № 4. – С. 22–27. – DOI: 10.31043/2410-2733-2020-4-22-27.
3. Гизатуллин, Р.С., Седых, Т.А. Состояние племенной базы молочного скотоводства Республики Башкортостан // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. – 2016. – № 3. – С. 55–59. – DOI: 10.12737/20338.
4. Состояние молочного скотоводства в Российской Федерации / Г. И. Шичкин, Е. Е. Тяпугин, И. М. Дунин [и др.] // Ежегодник по племенной работе в молочном скотоводстве в хозяйствах Российской Федерации (2022 год). – Лесные Поляны: ВНИИплем, 2023. – С. 3-20.
5. Характеристика популяционно-генетических и селекционных параметров признаков молочной продуктивности коров черно-пестрой и голштинской пород Республики Казахстан / А. Харжау // Генетика и разведение животных. – 2021. – № 4. – С. 48-58. – DOI: 10.31043/2410-2733-2021-4-48-58.
6. Иванова И.П., Троценко И.В. Оценка изменчивости и наследуемости селекционных признаков популяции молочного скота Омской области // Известия Горского государственного аграрного университета. 2021. Т. 58. № 4. С. 42-49. http://dx.doi.org/10.54258/20701047_2021_58_4_42.
7. Полногеномные исследования структуры популяций российских локальных пород черно-пестрого корня / А. С. Абдельманова, А. А. Сермягин, А. В. Доцев [и др.] // Генетика. – 2022. – Т. 58, № 7. – С. 786-797. – DOI: 10.31857/S0016675822070025.
8. Сермягин, А.А. Генетический и геномный прогноз племенной ценности быков-производителей черно-пестрой и голштинской пород в России / А. А. Сермягин, Н.А. Зиновьева // Достижения науки и техники АПК. – 2019. – Т. 33, № 12. – С. 77-82. – DOI: 10.24411/0235-2451-2019-11216.
9. Игнатьева, Л.П. Использование метода BLUP ANIMAL MODEL для оценки племенной ценности коров симментальской породы / Л. П. Игнатьева, А. А. Сермягин // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. – 2021. – № 4(56). – С. 188-194. – DOI: 10.18286/1816-4501-2021-4-188-194.
10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015663613 Российская Федерация. Селекционно-генетическая статистика – ВНИИГРЖ : № 2015617820 : заявл. 26.08.2015 : опубли. 25.12.2015 / С. М. Сергеев, О. В. Тулинова; заявитель Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Всероссийский научно-исследовательский институт генетики и разведения сельскохозяйственных животных".
11. Misztal I. BLUPF90 and related programs (BGF90). Proceedings of the 7th world congress on genetics applied to livestock production / I. Misztal, S. Tsruta, T. Strabel, B. Auvray, T. Druet, D.H. Lee // Montpellier, Communication. – 2002. – No. 28 – 07. – Vol. 28. – Pp. 21–22.

REFERENCES

1. Kharitonov, S.N. et al. (2018) 'The main breeding traits in the russians' black-and-white cattle under dynamics of the changing population level', *Molochnoe i myasnoe skotovodstvo*, no. 7, pp. 13–17.
2. Sevostyanov, M., Likhodeevskaya, O. and Gorelik, O. (2020) 'Breeding parameters of the main economically useful traits of milk productivity of black-and-white Ural type cows', *Genetika i razvedenie zhivotnyh*, no. 4, pp. 22–27, DOI: 10.31043/2410-2733-2020-4-22-27.
3. Gizatullin, R. and Sedykh, T.Ya. (2016) 'Dairy cattle breeding stock condition in republic of Bashkortostan', *Izvestiya Samara Agricultural Academy*, no. 3, pp. 55-59. – DOI: 10.12737/20338.

4. Shichkin, G.I., Tyapugin, E.E., Dunin, I.M. et al. (2023) ‘The state of dairy farming in the Russian Federation’, *Yearbook on breeding work in dairy cattle breeding on farms of the Russian Federation*, Lesnye Polyany, FGBNU VNIIPlem, pp. 3–20.

5. Kharzhau, A., Shamshidin, A., Sermyagin, A. and Zhumanov, K. (2021) ‘Characteristics of population genetic and breeding parameters of the traits of milk productivity of black-and-white and Holstein cows of the Republic of Kazakhstan’, *Genetika i razvedenie zhivotnyh*, no. 4, pp. 48–58. – DOI: 10.31043/2410-2733-2021-4-48-58.

6. Ivanova, I.P. and Trotsenko, I.V. (2021), ‘Assessment of variability and heritability of breeding traits of the dairy cattle population of the Omsk Region’, *Proceedings of Gorsky State Agrarian University*, 58(4), pp. 42–49. (In Russian). http://dx.doi.org/10.54258/20701047_2021_58_4_42.

7. Abdelmanova, A.S., Sermyagin, A.A., Dotsev, A.V. et al. (2022) ‘Whole-Genomic Studies of the Population Structure of Russian Local Black-Pied Breeds’, *Russian Journal of Genetics*, vol. 58, no. 7, pp. 804–813. – DOI: 10.1134/s102279542207002x.

8. Sermyagin, A.A. and Zinovieva, N.A. (2019) ‘Genetic and Genomic Prediction of Breeding Values of Russian Black-and-White and Holstein Bulls’, *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*, vol. 33, no. 12, pp. 77–82 (in Russ.). DOI: 10.24411/0235-2451-2019-11216.

9. Ignatieva, L.P. and Sermyagin, A. A. (2021) ‘Usage of the Blup Animal Model for estimation of the breeding value of Simmental cows’, *Vestnik Ul'yanovskoj gosudarstvennoj sel'skokozyajstvennoj akademi*, 4 (56), pp. 188–194, DOI: 10.18286/1816-4501-2021-4-188-194.

10. Sergeev, S.M. and Tulinova, O.V. (2015), Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM No. 2015663613 Rossiyskaya Federatsiya. Seleksionno-geneticheskaya statistika – VNIIGRZH: No. 2015617820.

11. Misztal, I., Tsruta, S., Strabel, T., Auvray, B., Druet, T. and Lee, D.H. (2002), “BLUPF90 and related programs (BGF90). Proceedings of the 7th world congress on genetics applied to livestock production”, *Montpellier, Communication*, vol. 28, no. 7, pp. 21–22.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Ольга Константиновна Васильева, кандидат сельскохозяйственных наук, научный сотрудник лаборатории генетики и разведения крупного рогатого скота, Всероссийский научно-исследовательский институт генетики и разведения сельскохозяйственных животных – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика Л. К. Эрнста», пос.Тярлево, Санкт-Петербург, Россия; <http://orcid.org/0000-0001-8361-8399>, SPIN-код: 5612-5783; e-mail: vaciola@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Olga K. Vasileva, Cand. Sci. (Agri.), Researcher Laboratory of Genetics and Cattle Breeding, Russian Research Institute of Farm Animal Genetics and Breeding – Branch of the L.K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry, v. Tyrlevo, St. Petersburg, Russia; <http://orcid.org/0000-0001-8361-8399>, SPIN-code: 5612-5783; e-mail: vaciola@mail.ru.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов

The author declares no conflicts of interests

Поступила в редакцию / Received 12.06.2024
Поступила после рецензирования / Revised 02.09.2024
Принята к публикации / Accepted 04.09.2024

Научная статья/Original article

УДК: 636.1.082

Код ВАК 4.2.5


DOI: 10.24411/2078-1318-2024-3-89-98

ОСОБЕННОСТИ ГЕНЕТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ЛОШАДЕЙ ТРАКЕНЕНСКОЙ ПОРОДЫ ПО МИКРОСАТЕЛЛИТНЫМ ЛОКУСАМ

А.В. Дорофеева¹ , Т.Н. Головина²  , Е.Г. Самандеева¹ 

¹Всероссийский научно-исследовательский институт коневодства
пос. Дивово, Рязанская обл., Россия

²Санкт-Петербургский государственный аграрный университет
г. Пушкин, г. Санкт-Петербург, Россия

 konikurs@mail.ru

Реферат. Траккененская порода лошадей имеет закрытую племенную книгу, не допуская прилития крови других полукровных пород. Современная наука даёт возможность с помощью ДНК-маркеров изучать процессы, происходящие в породе, и регулировать её генетическое разнообразие. В статье представлены результаты анализа генетической структуры траккененской породы лошадей (n=1071) по микросателлитным локусам ДНК. При анализе полученных данных в 17 панельных локусах было идентифицировано 125 аллелей, из которых 77 типичных ($q > 0,05$) и 48 редких ($q < 0,05$) для породы. Среди 11 редких аллелей, отсутствующих у лошадей трёх чистокровных пород, три аллеля (АНТ5I, НТГ10N, АСВ17F) дублируются в белорусской и российской траккененских популяциях. Аллель НМС2O встречается у российских, немецких и белорусских лошадей. Использование в отечественной популяции траккененских лошадей из Белоруссии и Германии привнесло в породу новые аллели, наглядно демонстрируя эффективность такого метода чистопородного разведения, как «освежение крови». Так, только у немецкого жеребца Вино Россо и его потомков встречается аллель НТГ7P. Редкий аллель АНТ5I имеет импортированный из Литвы Араратас и его приплод. Возможно, производитель конного завода им. Л.М. Доватора Хирамас привнёс в нашу популяцию аллель НМС1N. Результаты сравнительного анализа генетической структуры траккененской породы России и Белоруссии, а также наличие редких аллелей лошадей, поступивших из Германии, свидетельствуют об отличиях в их аллелофонде, что позволяет вести племенную работу, не опасаясь снижения генетического разнообразия и последствий инбредной депрессии. Выявленные редкие аллели траккененских лошадей, которые не встречаются в трёх чистокровных породах, отмечены у некоторых местных пород, в том числе у вятской.


Ключевые слова: микросателлиты ДНК, гетерозиготность, инбридинг, селекция, аллели, траккененская порода, лошади

Для цитирования. Дорофеева, А.В., Головина, Т.Н., Самандеева, Е.Г. Особенности генетической структуры лошадей траккененской породы по микросателлитным локусам // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2024. – № 3 (77). – С. 89–98. – DOI: 10.24411/2078-1318-2024-3-89-98.

FEATURES OF THE GENETIC STRUCTURE OF TRAKEHNER HORSES
BY MICROSATELLITE LOCI

A.V. Dorofeeva¹ , T.N. Golovina²  , E.G. Samandeeva¹ 

¹All-Russian Research Institute of Horse Breeding
Divovo, Ryazan Region, Russia

²Saint-Petersburg State Agrarian University
Pushkin, St. Petersburg, Russia
 konikurs@mail.ru

Abstract. The Trakenen horse breed has a closed stud book, preventing the blood of other half-breeds. Modern science makes it possible to use DNA markers to study the processes occurring in a breed and regulate its genetic diversity. The article presents the results of the analysis of the genetic structure of the Traken horse breed (n=1071) by microsatellite DNA loci. When analyzing the data obtained, 125 alleles were identified in 17 panel loci, of which 77 were typical ($q > 0.05$) and 48 rare ($q < 0.05$) for the breed. Among 11 rare alleles missing in horses of three purebred breeds, three alleles (AHT5I, HTG10N, ASB17F) are duplicated in the Belarusian and Russian Traken populations. The HMS2O allele is found in domestic, German and Belarusian horses. The use of Traken horses from Belarus and Germany in the domestic population has introduced new alleles into the breed, clearly demonstrating the effectiveness of such a method of purebred breeding as "blood refreshment". Thus, only the German stallion Vino Rosso and his descendants have the HTG7P allele. The rare AHT5I allele has Araratas and its offspring imported from Lithuania. Perhaps the stud stallion of the L.M. Dovator Hiras stud farm introduced the HMS1N allele into our population. The results of a comparative analysis of the genetic structure of the Traken breed of Russia and Belarus, as well as the presence of rare alleles of horses from Germany, indicate differences in their allelofund, which allows breeding work without fear of reducing genetic diversity and the consequences of inbred depression. The identified rare alleles of Traken horses, which are not found in three purebred breeds, have been noted in some local breeds, including the Vyatka.

Keywords: DNA microsatellites, heterozygosity, inbreeding, breeding, alleles, Traken breed, horses

For citation: Dorofeeva, A.V., Golovina, T.N., Samandeeva, E.G. (2024) 'Features of the genetic structure of Trakehner horses by microsatellite loci', *Izvestia of Saint-Petersburg State Agrarian University*, vol. 77, no. 3, pp. 89–98. (In Russ.) DOI: 10.24411/2078-1318-2024-3-89-98.

Введение. Основой создания тракененской породы в 1732 г. стали кобылы из Англии, Дании, Турции, Персии и других стран. В дальнейшем жеребцы из конного завода «Тракенен» использовались для улучшения местной крестьянской лошади, заложив основы восточно-пруссской породы [1].

В 1960-е годы в СССР из Польши поступила крупная партия восточно-пруссских лошадей для комплектации Нямунского, Кировского, Починковского и Старожиловского конных заводов [2]. В Белоруссии широко использовались потомки жеребца Фальстаффа из ГДР. В последние 20 лет в РФ поступали тракененские лошади из Литвы, Германии и Белоруссии, привнося в породу «новую кровь» и, вероятно, новые варианты генов [3]. Современная наука даёт возможность с помощью ДНК-маркеров изучать процессы, происходящие в породе, контролировать и регулировать её генетическое разнообразие [4,5].

Генетическая структура группы лошадей тракененской породы по STR локусам ранее уже была исследована в работах Блохиной Н.В. При исследовании 59 голов было обнаружено 105 аллелей, а эффективное число аллелей составило 3,904. Тогда же были опубликованы

данные о высоком генетическом сходстве между тракненской и чистокровной верховой породой – 0,922. При этом генетическое сходство с арабской породой составило 0,770, с ахалтекинской – 0,733, что говорит о сильной дифференциации пород [6,7].

При анализе белорусской популяции тракненских лошадей в 2022 г. были опубликованы материалы о её генетической структуре, выявлено 78 типичных и 30 редких аллелей. Сравнение двух популяций представляет собой большой интерес, так как поголовье конного завода им. Л.М. Доватора комплектовалось в том числе за счёт кобыл восточно-прусского происхождения из Польши [8]. Исследование особенностей генетической структуры тракненской породы с учётом уровня гетерозиготности, целесообразности применения метода «обновления крови» с помощью отдалённых в поколениях тракненских лошадей из других стран имеет большое значение для дальнейшей селекционной работы.

Новизна исследований. Проанализированы результаты тестирования 1071 лошади тракненской породы по 17 микросателлитным локусам ДНК. Получены новые данные об особенностях генетической структуры популяций тракненских лошадей России и Беларуси.

Цель исследования. Анализ генетической структуры тракненской породы лошадей с использованием микросателлитных маркеров ДНК.

Материалом для исследования послужили результаты тестирования лошадей тракненской породы на бумажных носителях по 17 микросателлитным локусам (VHL20, HTG4, АНТ4, HMS7, HTG6, АНТ5, HMS6, ASB23, ASB2, HTG10, HTG7, HMS3, HMS2, ASB17, LEX3, HMS1, СА425, – см. таблицу 1), сделанные в лабораториях генетики ФГБНУ «ВНИИ коневодства», ООО «Гордиз» и Certagen GmbH. В выборку вошли лошади, рождённые в РФ, Республике Беларусь, Германии, Литве, а также их потомки, рождённые в нашей стране.

Таблица 1. Спектр аллелей 17 микросателлитных локусов у лошадей тракненской породы и их наличие в других породах (n=1071 голова)
Table 1. Allele spectrum of 17 microsatellite loci in Traken horses and their presence in other breeds (n=1071 heads)

Локусы	Типичные аллели (q > 0,05), общие с чистокровной верховой и арабской	Редкие аллели (q < 0,05) и общие с:			
		Чисто- кровной верховой	Арабской	Ахал- текин- ской	Другие
VHL20	I,L,M,N	R		R,P,Q	-
HTG4	K,M	L,N,P			-
АНТ4	H,J,K,O	-		I,M,P	L
HMS7	J,K,L,M,N,O	-		-	-
HTG6	G,J,O,R	M,P	M	P	-
АНТ5	J,K,M,N,O	-		-	I
HMS6	K,M,O,P	L		-	-
ASB23	I,J,K,L,S,U	-		-	-

**ЗООТЕХНИЯ, ГЕНЕТИКА И СЕЛЕКЦИЯ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЖИВОТНЫХ
ANIMAL SCIENCE, GENETICS AND BREEDING OF FARM ANIMALS**

ASB2	B,K,M,N,P,Q,R	I,O		-	J
HTG10	I,K,L,M,O,R	S		P,Q	J,N
HTG7	K,N,O	M	-	M	P
HMS3	I,M,N,O,P	R		Q,R,S	-
HMS2	K,L,M	H,J	H,I,P	H,I,P,J	O
ASB17	G,M,N,O,R	H,Q	J,Q	H,K,Q	F,P
LEX3	H,L,M,O,P	F,I,N	F,I,K,N		-
HMS1	I,J,M	L	L,K	-	N,Q
CA425	G,J,M,N,O	I,L			-

Результаты исследования. При анализе генотипов лошадей по 17 микросателлитным локусам (таблица 1) было идентифицировано 125 аллелей, в том числе 77 типичных ($q > 0,05$) и 48 редких ($q < 0,05$). Все типичные и 37 редких аллелей полностью совпадают с аллелями чистокровной верховой, арабской и ахалтекинской пород. Так, из 37 аллелей 17 присутствуют во всех трёх породах, 10 являются общими только с ахалтекинскими лошадьми, 4 – общими одновременно с чистокровными верховыми и ахалтекинскими, 2 – только с арабскими, 2 – арабскими и чистокровными верховыми, 2 – арабскими и ахалтекинскими.

Наибольший интерес представляют 11 редких аллелей, которые выпадают из общего ряда и не встречаются у представителей современных чистокровных пород, но зато встречаются у лошадей местных пород. Так, в вятской породе имеются аллели АНТ4L, АНТ5I, ASB2J, НТГ10J, НТГ10N, НТГ7P, ASB17F, ASB17P, HMS1N, HMS1Q, а в башкирской и мезенской – HMS2O. И здесь мы можем провести параллель между вятской породой России и такой же местной породой Восточной Пруссии – «швайке», на основе которой была создана восточно-прусская порода. С другой стороны, эти аллели вполне могли присутствовать в генетической структуре чистокровных пород прошлых веков и других стран. В качестве примера можно привести рождённого в Германии жеребца Вино Россо, у которого выявлен аллель НТГ7P, унаследованный и его потомками. Аналогичный пример – редкий аллель АНТ5I, который имеется у 5 лошадей – жеребца Араратаса и 4 его потомков. Происхождение Араратаса объединяет тракенов Литвы, России, Польши и Германии.

В локусе АНТ4 три редких для породы аллеля совпадают с аналогичными у ахалтекинских лошадей: АНТ4I, АНТ4M и АНТ4P. Интересно, что в белорусской популяции аллель АНТ4P является типичным, а АНТ4M отсутствует. В локусе НТГ6 среди редких мы видим аллель НТГ6P, описанный как редкий в чистокровной верховой и ахалтекинской породах, а также НТГ6M, встречающийся у чистокровных верховых и арабских лошадей.

Аллель ASB2J в нашей выборке встречается у потомков польской Дедикации и Аларма из ГДР, но пока не обнаружен у тракенов Белоруссии, где использовалась Дедикация. В российской и белорусской популяциях выявлены редкие аллели НТГ10P и НТГ10N, зато аллели НТГ10S, НТГ10Q и НТГ10J обнаружены только у отечественных лошадей тракеновской породы.

Редкий аллель HMS2O встречается у 6 разных лошадей – 2 немецкого происхождения, 2 белорусского и 2 российского. Интересно, что этот аллель типичен для мезенской лошади [9], а у тракененских лошадей Белоруссии пока не обнаружен [7].

Отсутствующий в чистокровных породах аллель ASB17F встречается у отечественных и белорусских тракененских лошадей. Аллели АНТ4Р, ASB17Р, ASB17Н, LEX3N, СА425 L и HMS1N относятся к редким для отечественной популяции и типичным для белорусской. К примеру, аллель HMS1N имеют 8 голов, из них 5 потомков Хирамаса от Ветерка, рождённого в Нямунском конном заводе, 2 внука Ветерка и 1 жеребчик, имеющий в родословной предков из Литвы. Этот редкий для российской породы аллель типичен для белорусской популяции, так как там широко использовался Хирамас, его сын и дочери. Аллель HMS1Q имеют 12 лошадей, у которых в родословной есть представители тракененской породы из Белоруссии. Типичными для тракененской популяции РФ, но редкими в Белоруссии являются аллели: НТГ10М, ASB2Р, HMS6К, СА425G, СА425J. Разная частота встречаемости отдельных аллелей, отличия в генетической структуре родственных, но развивавшихся некоторое время обособлено популяциях подтверждает действенность метода «освежения крови» и может служить дополнительным ресурсом для совершенствования породы [10, 11].

Коэффициент внутривидового инбридинга (Fis) по данной выборке положителен и составляет в среднем 0,007, что говорит о небольшом дефиците гетерозиготных генотипов. По этому показателю тракененская порода наиболее близка чистокровной верховой с результатом Fis 0,001 (таблица 2).

Таблица 2. Показатели популяционного разнообразия микросателлитных локусов в тракененской породе РФ

Table 2. Indicators of population diversity of microsatellite loci in the Trakenen breed of the Russian Federation

Локусы	Количество		Число эффективных аллелей на локус (Ae)	Гетерозиготность		Fis
	Голов	Аллелей		Наблюдаемая (Ho)	Ожидаемая (He)	
VHL20	1071	7	4,261	0,761	0,765	0,006
НТГ4	1070	5	2,175	0,521	0,540	0,035
АНТ4	1070	8	3,675	0,690	0,728	0,052
HMS7	1069	6	4,936	0,810	0,797	-0,016
НТГ6	1064	6	3,411	0,687	0,707	0,028
АНТ5	1062	6	4,871	0,801	0,795	-0,008
HMS6	1067	5	3,216	0,668	0,689	0,030
ASB23	1064	6	4,592	0,781	0,782	0,002
ASB2	1065	10	6,632	0,847	0,849	0,003
НТГ10	829	11	4,695	0,808	0,787	-0,027
НТГ7	1066	5	2,645	0,622	0,622	0,000
HMS3	1043	8	4,698	0,746	0,787	0,052

**ЗООТЕХНИЯ, ГЕНЕТИКА И СЕЛЕКЦИЯ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЖИВОТНЫХ
ANIMAL SCIENCE, GENETICS AND BREEDING OF FARM ANIMALS**

HMS2	699	9	2,668	0,668	0,625	-0,069
ASB17	1064	11	4,783	0,791	0,791	-0,001
LEX3	668	9	5,630	0,817	0,822	0,006
HMS1	1051	7	1,859	0,446	0,462	0,034
CA425	1005	7	2,763	0,640	0,638	-0,003
В среднем тракене- нская порода		7,412	3,971	0,712	0,717	0,007
Чистокр. верховая [6]		5,882	3,488	0,681	0,682	0,001
Арабская [6]		6,118	3,180	0,631	0,655	0,032
Ахалтекинская [9]		7,118	3,799	0,694	0,692	-0,003

Средний уровень полиморфности (A_e) по данной группе тракененских лошадей составляет 3,971, превышая это показатель во всех чистокровных породах (таблица 2). В восьми локусах это значение ниже среднего по выборке. Минимальное значение уровня полиморфности (A_e) – 1,859 в локусе HMS1, максимальное – 6,632 в локусе ASB2.

В среднем уровень наблюдаемой гетерозиготности (H_o) равен 0,712, что превышает показатели 3 чистокровных пород, особенно арабской. В 17 локусах находится от 5 до 11 аллелей. Наибольшим уровнем наблюдаемой гетерозиготности отличается локус ASB2 – 0,847, и в нём же самый высокий уровень ожидаемой гетерозиготности – 0,849. Из 17 локусов только в 6 избыток гетерозигот, причём 3 из них имеют редкие аллели, связанные с лошадьми немецко-литовской (АНТ5) или белорусской популяции (HMS2, ASB17).

Более полное изучение генетической структуры лошадей тракененской породы Германии, Польши, Литвы, Эстонии, Белоруссии, Чехии и других стран позволит детально проанализировать изменения, происходящие в популяциях, развивающихся независимо друг от друга.

Заключение. Результаты изучения генетической структуры тракененской породы по STR-маркерам показали, что данный метод может быть эффективен в селекции для корректировки близкородственного разведения, составления внутрелинейных подборов, использования аутбридинга, привлечения в племенную работу тракененских и чистокровных лошадей других заводов и стран. Это особенно актуально для тракененской породы, имеющей закрытую племенную книгу, в условиях запрета на ввоз в РФ племенных лошадей.

Выводы. При анализе 1071 лошадей тракененской породы по 17 микросателлитным локусам было идентифицировано 125 аллелей, в том числе 77 типичных ($q > 0,05$) и 48 редких ($q < 0,05$). В общей сложности 114 аллелей (91%) лошадей тракененской породы совпадают с аллелями чистокровной верховой, арабской или ахалтекинской пород, участвовавших в её создании и совершенствовании.

Из 48 редких аллелей для породы 17 являются редкими и для тракененских лошадей Белоруссии. Типичными для тракененской популяции РФ, но редкими для белорусской являются аллели: НТГ10М, ASB2Р, HMS6К, СА425G, СА425J. Редкими для РФ и типичными для тракененской популяции РБ являются аллели: АНТ4Р, ASB17Р, ASB17Н, LEX3N, HMS1N, СА425L. Аллель НТГ7Р встречается у лошадей из Германии, АНТ5I – из Литвы.

Различия в генетической структуре тракененской породы России и Белоруссии, а также наличие новых аллелей у лошадей, поступивших из Германии, позволяют вести племенную работу с породой без снижения генетического разнообразия и последствий инбредной депрессии. Уровень полиморфности (A_e) тракененской породы равен 3,971, уровень наблюдаемой гетерозиготности (H_o) – 0,712, ожидаемой (H_e) – 0,717, превышая аналогичные показатели в чистокровных породах.

Коэффициент внутривидового инбридинга (F_{is}) в породе положителен и составляет в среднем 0,007, что говорит о недостатке гетерозиготных генотипов. По данному показателю лошади тракененской породы наиболее близки чистокровным верховым ($F_{is}=0,001$), широко используемым в тракененской селекции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чашкин, И.Н., Дорофеева, Н.В., Шахова, И.С. Тракененская порода лошадей и методы её совершенствования // ГПК тракененской породы. – М., 1974. – Т. 1. – С. 9–200.
2. Камзолов, Б.В. История тракененской лошади. – Минск, 2002. – 384 с.
3. Дорофеева, А.В. 285 лет 285 лет конному заводу «Тракенен» (1732-2017 гг.) // Коневодство и конный спорт. – 2017. – № 4. – С. 28–30.
4. Полиморфизм ДНК лошади *Equus Caballus* и методы его выявления / Р. Р. Гарафутдинов и др. // Биомика. – 2020. – Т. 12, № 2. – С. 272–299.
5. Глинская, Н.А., Приловская, Е.И., Каспирович, Д.А. и др. Особенности SSR-полиморфизма лошадей // Вестник Полесского государственного университета. Серия природоведческих наук. – 2017. – № 1. – С. 8–13.
6. Глинская, Н.А., Епишко, Т.И., Епишко, О.А. Анализ генетического разнообразия популяций черно-пестрого крупного рогатого скота по STR-локусам // Актуальные проблемы сельскохозяйственной биотехнологии: сборник научных трудов учреждения образования «Полесский государственный университет». – Пинск, 2012. – С. 21–25.
7. Блохина, Н.В. Использование ДНК маркеров для идентификации, сохранения и развития генетических ресурсов коневодства Российской Федерации. Дисс.... докт. биол. наук: 06.02.07 / Н. В. Блохина // ВНИИ коневодства. – Дивово (Ряз. обл.), 2022. – 271 с.
8. Храброва, Л.А., Блохина, Н.В. Генетический мониторинг чистокровной верховой породы лошадей по локусам микросателлитов ДНК // Генетика и разведение животных. – 2018. – № 3. – С. 11–15.
9. Генетическая характеристика лошадей тракененской породы с использованием данных полиморфизма микросателлитных локусов ДНК / А. Н. Рудак // Актуальные проблемы интенсивного развития животноводства. – 2022. – № 25-1. – С. 23–30.
10. Абрамова, Н.В., Устьянцева, А.В., Рябова, Т.Н. Генетическое разнообразие ахалтекинской породы лошадей по локусам микросателлитов ДНК // Коневодство и конный спорт. – 2019. – № 2. – С. 7-9.
11. Вдовина, Н.В., Юрьева, И.Б. Мониторинг генетической структуры мезенской породы лошадей по микросателлитам ДНК // Вавиловский журнал генетики и селекции. – 2021. – Т. 25. № 2. – С. 202–207.
12. Басс, С.П., Белоусова, Н.Ф., Атнабаева, Н.А. Генетические методы в линейном разведении лошадей вятской породы с использованием микросателлитов ДНК // Известия Оренбургского ГАУ. – 2023. – № 1 (99). – С. 312-317.

REFERENCES

1. Chashkin, I.N., Dorofeeva, N.V., Shakhova, I.S. (1974), Trakenenskaja breed and methods of its improvement, *GPK Trakenenskaya breed*, M., vol. 1, pp. 10-200.

2. Kamzolov, B.V. (2002), The history of the Traken horse, Minsk, 384 p.
3. Dorofeeva, A.V. (2017), “285 years 285 years of the Trakenen stud farm (1732-2017)”, *Horse breeding and equestrian sports*, No. 4, pp. 28-30.
4. Glinskaya, N.A. et al. (2017), “Features of SSR polymorphism of horses” [Osobennosti SSR-polimorfizma loshadej], *Bulletin of Polessky State University. Nat. Sc.*, No. 1, pp. 8-13.
5. Glinskaya, N.A., Epishko, T.I., Epishko, O.A. (2012), “Analysis of the genetic diversity of populations of black-and-white cattle by STR loci” [Analiz geneticheskogo raznoobraziya populyacij cherno-pestrogo krupnogo rogatogo skota po STR-lokusam], *Actual problems of agricultural biotechnology: collection of scientific papers of the educational institution "Polessky State University"*, Pinsk, pp. 21-25.
6. Blokhina, N.V. (2022), The use of DNA markers for the identification, conservation and development of genetic resources of horse breeding in the Russian Federation. Diss....doct. Biol. sciences: 02/06/07/ N.V. Blokhina// Research Institute of Horse Breeding, Divovo, 2022. – 271 p.
7. Khrabrova, L.A., Blokhina, N.V. (1974), “Genetic monitoring of purebred horse breeds by DNA microsatellite loci” [Geneticheskij monitoring chistokrovnoj verhovoj porody loshadej po lokusam mikrosatellitov DNK], *Genetics and animal breeding*, no. 3, 2018, pp. 11-15.
8. Rudak, A.N. et al. (2022), “Genetic characteristics of Trakenen horses using polymorphism data of myctosatellite DNA loci” [Geneticheskaya harakteristika loshadej trakenenskoj porody s ispol'zovaniem dannyh polimorfizma miktosatellitnyh lokusev DNK], *Actual problems of intensive development of animal husbandry*, No. 25-1, pp. 23-30.
9. Abramova, N.V., Ustyantseva, A.V., Ryabova, T.N. (2019), “Genetic diversity of the Akhal-Teke horse breed by DNA microsatellite loci” [Geneticheskoe raznoobraziye ahaltekinskoj porody loshadej po lokusam mikrosatellitov DNK], *Horse breeding and equestrian sport*, No. 2, pp. 7-9.
10. Vdovina, N.V., Yuryeva, I.B. (2021), “Monitoring the genetic structure of the Mezen horse breed by DNA microsatellites” [Monitoring geneticheskoy struktury mezenskoj porody loshadej po mikrosatellitam DNK], *Vavilovsky Journal of Genetics and Breeding*, vol. 25, No. 2, pp. 202-207.
11. Bass, S.P., Belousova, N.F., Atnabayeva, N.A. (2023), “Genetic methods in linear breeding of Vyatka horses using DNA microsatellites” [Geneticheskie metody v linejnom razvedenii loshadej vyatskoj porody s ispol'zovaniem mikrosatellitov DNK], *Proceedings of the Orenburg State Agrarian University*, No. 1 (99), pp. 312-317.
12. Garafutdinov, R.R., Gainullina, K.P., Kiryanova, O.Yu. et al. (2020), “Equus Caballus horse DNA polymorphism and methods of its detection” [Polimorfizm DNK loshadi Equus Caballus i method ego vyyavleniya], *Biomika*, vol. 12, No. 2, pp. 272-299.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Анна Витальевна Дорофеева, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник отдела селекции федерального государственного бюджетное научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт коневодства, пос. Дивово, Рязанская обл., Россия; <http://orcid.org/0000-0002-9114-3124>, SPIN-код: 8912-9480; e-mail: rustrak2007@yandex.ru.

Татьяна Николаевна Головина, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, заведующий кафедрой модернизации технологий в АПК, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет», Пушкин, Санкт-Петербург, Россия; <https://orcid.org/0000-0002-3806-3328>, SPIN-код: 2969-2080; e-mail: konikurs@mail.ru.

Екатерина Геннадьевна Самандеева, младший научный сотрудник отдела селекции федерального государственного бюджетное научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт коневодства, пос. Дивово, Рязанская обл., Россия; <http://orcid.org/0000-0002-3954-9899>, SPIN-код: 7336-8844; e-mail: rustrak2007@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anna V. Dorofeyeva, Cand. Sci. (Agric.), Senior Researcher of the Breeding Department Federal State Budgetary Scientific institution «All-Russian Research Institute of Horse Breeding», Divovo, Ryazan Region, Russia; <http://orcid.org/0000-0002-9114-3124>, SPIN- code: 8912-9480; e-mail: rustrak2007@yandex.ru.

Tatyana N. Golovina, Cand. Sci. (Agric.), Associate Professor, Department of Technology Modernization in Agriculture, Federal state budgetary educational institution of higher education "Saint Petersburg state agrarian University", Pushkin, St. Petersburg, Russia; <https://orcid.org/0000-0002-3806-3328>, SPIN-code: 2969-2080; e-mail: konikurs@mail.ru.

Ekaterina G. Samandeeva, Junior Researcher of the Breeding Department Federal State Budgetary Scientific institution «All-Russian Research Institute of Horse Breeding», Divovo, Ryazan Region, Russia; <http://orcid.org/0000-0002-3954-9899>, SPIN-code: 7336-8844; e-mail: rustrak2007@yandex.ru.

Авторский вклад. Все авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении и анализе данного исследования. Все авторы настоящей статьи ознакомились и одобрили представленный окончательный вариант.

Author's contribution. All authors of this research paper have directly participated in the planning, execution, or analysis of this study. All authors of this paper have read and approved the final version submitted.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Received 25.04.2024
Поступила после рецензирования / Revised 15.08.2024
Принята к публикации / Accepted 20.08.2024


Научная статья/Original article

УДК 636.3:636.033

Код ВАК 4.2.5

DOI: 10.24411/2078-1318-2024-3-98-105

ПОЛИМОРФИЗМ ГЕНА ИНСУЛИНОПОДОБНОГО ФАКТОРА РОСТА
(IGF-1) У ОВЕЦ ЮЖНОЙ МЯСНОЙ ПОРОДЫА.Д. Соловьева¹  , Т.Е. Денискова¹ 

¹Федеральный исследовательский центр животноводства – Всероссийский научно-исследовательский институт животноводства имени академика Л.К. Эрнста
пос. Дубровицы, г.о. Подольск, Московская область, Россия
 anastasiya93@mail.ru

Реферат. Полиморфизм генов играет ключевую роль в определении фенотипических различий между организмами. Одним из важных генов, ответственных за рост и развитие у млекопитающих, является ген инсулиноподобного фактора роста (*IGF-1*). Он кодирует белок, который участвует в регуляции роста и размножения клеток, а также в процессах липидогенеза и пролиферации. Южная мясная порода – это недавно созданная скороспелая полутонкорунная порода, генетические исследования которой отстают от аналогичных в других породах овец. Понимание генетических особенностей этой породы может способствовать отбору животных с более высокой продуктивностью и лучшим здоровьем. В данной статье мы исследовали полиморфизм гена *IGF-1* у овец южной мясной породы. Образцы ткани исследуемых овец ($n = 135$) были отобраны в Племенном заводе «Ладожский» – филиале ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста. Анализ включал в себя изучение полиморфизма гена *IGF-1* у овец южной мясной породы. Анализ полиморфизма гена *IGF-1* был выполнен с использованием метода ПЦР-ПДРФ. Выявлены все аллельные варианты *IGF-1*^{CC}, *IGF-1*^{CT}, *IGF-1*^{TT}. Аллель Т характеризовался наибольшей частотой встречаемости (0,715). В разрезе генотипов варианты ТТ и СТ преобладали в изучаемой популяции овец и имели частоту встречаемости 49% и 45%. У ярок генотип СС был более распространен, чем в группах баранов и баранчиков (11,77% по сравнению с 5,0% и 4,77% соответственно). Таким образом, учитывая выявленный генетический полиморфизм в аллельных вариантах, рекомендуется включать ген *IGF-1* в программы маркер-ориентированной селекции у южной мясной породы.


Ключевые слова: овцеводство, южная мясная порода, мясная продуктивность, инсулиноподобный фактор роста, IGF-1

Для цитирования: Соловьева, А.Д., Денискова, Т.Е. Полиморфизм гена инсулиноподобного фактора роста (IGF-1) у овец южной мясной породы // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2024. – № 3. – С. 98–105. – DOI: 10.24411/2078-1318-2024-3-98-105.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (тема FGGN-2024-0015).

INSULIN-LIKE GROWTH FACTOR (IGF-1) GENE POLYMORPHISM IN SHEEP OF SOUTHERN MEAT BREED

A.D. Solovyova¹  , T.E. Deniskova¹ 

¹Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member L.K. Ernst
Dubrovitsy settlement, Podolsk city district, Moscow Region, Russia
 anastasiya93@mail.ru

Abstract. Gene polymorphism plays a key role in determining phenotypic differences between organisms. One of the important genes responsible for growth and development in mammals is the insulin-like growth factor *IGF-1* gene. This gene encodes a protein that is involved in the regulation of cell growth and reproduction, as well as in the processes of lipidogenesis and proliferation. The southern meat breed is a recently developed, early maturing, semi-fine wool breed, whose genetic research has lagged those conducted in other breeds. Understanding genetic characteristics of this breed can promote selection of animals with higher productivity and better health. In this article, we investigated the polymorphism of *IGF-1* gene in sheep of the southern meat breed. Tissue samples from the studied sheep (n=135) were collected at the Ladozhsky Breeding Plant, a branch L.K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry. Our analysis included the study of *IGF-1* gene polymorphism of sheep of the southern meat breed. Analysis of *IGF-1* gene polymorphism was performed using the PCR-RFLP method. All allelic variants of *IGF-1^{CC}*, *IGF-1^{CT}*, *IGF-1^{TT}* were identified. The T allele was characterized by the highest frequency (0.71). In terms of genotypes, the TT and CT variants predominated in the studied sheep population and had a frequency of 48.9 and 44.45%, respectively. The CC genotype was more frequent in the group of young ewes than in the ram and young ram groups (11.77% compared to 5.0 and 4.77%, respectively). Thus, considering the identified genetic polymorphism in allelic variants, we recommend including the *IGF-1* gene in marker-assisted selection programs in the Southern Meat breed.

Keywords: sheep breeding, southern meat breed, meat productivity, insulin-like growth factor, *IGF-1*

For citation: Solovyova, A.D., Deniskova, T.E. (2024) 'Insulin-like growth factor (IGF-1) gene polymorphism in sheep of southern meat breed', *Izvestiya of Saint-Petersburg State Agrarian University*, vol. 77, no. 3 pp. 98–105. (In Russ.) DOI: 10.24411/2078-1318-2024-3-98-105.

Financial support. The research was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation according to theme No. FGGN-2024-0015.

Введение. Овцеводство играет жизненно важную роль в обеспечении потребностей сельского населения. В развивающихся странах наблюдается высокий спрос на производство молока, шерсти и мяса, что обеспечивает получение дохода для фермеров [1, 2]. Показатели роста животного – это одни из наиболее важных экономически значимых признаков в овцеводстве. Показатели роста, включая живую массу, среднесуточный прирост и размеры туловища, в значительной степени влияют на мясную продуктивность, что в свою очередь влияет на производство и рентабельность отрасли производства баранины [3]. Из литературных источников следует, что многие гены-кандидаты связаны с фенотипическими признаками животного [4, 5]. Значимым геном является инсулиноподобный фактор роста (*IGF-1*), эндокринный фактор роста, участвующий в нормальном росте и развитии, эмбриогенезе и во многих метаболических процессах сельскохозяйственных животных [6].

В животноводстве достижения молекулярной генетики позволили распознавать гены и вариации последовательностей, связанные с рядом признаков роста. Существует множество разработок в области молекулярных технологий, включая идентификацию генетического разнообразия в геномных участках и выявление взаимосвязи с экономически значимыми и адаптационными характеристиками.

Согласно литературным источникам, установлены значимые ассоциации между однонуклеотидными полиморфизмами (SNP) *IGF-1* и *IGF-2* и показателями роста у различных сельскохозяйственных животных, включая крупный рогатый скот [7], буйволов [8], свиней [9] и коз [10]. Сообщалось, что у овец SNP *IGF-1* связан с производством мяса и ростом [11]. Используя метод анализа полиморфизма длин рестрикционных фрагментов (PCR-RFLP, ПЦР-ПДРФ), Е.А. Гроховская с соавторами, обнаружили достоверно значимое влияние SNP, расположенных в 5'-нетранслируемой (5'-UTR) области *IGF-1*, на мясные характеристики и состав мяса у польских мериносов [12]. Negahdary et al. выявили достоверно значимое влияние геномной области 5' UTR гена *IGF-1* на массу тела при рождении, массу при отъеме, массу тела в возрасте 6 месяцев, среднесуточный прирост от рождения до отъема и среднесуточный прирост от 6 до 9 месяцев у овец породы Макоэй [13]. Установление связей между генетическими полиморфизмами и особенностями роста предоставляет полезную информацию для генетического совершенствования в овцеводстве. SNP в экзонах генов важны, поскольку они могут вызывать потенциально функциональные вариации, которые приводят к фенотипическим изменениям у сельскохозяйственных животных.

Цель исследования – изучение полиморфизма и определение частот встречаемости аллельных вариантов инсулиноподобного фактора роста (*IGF-1*) у овец южной мясной породы.

Материалы, методы и объекты исследования. Исследования проводились на образцах ткани (ушной выщип) генофондных овец южной мясной породы в количестве 135 голов, которые состояли из трех групп – генофондные бараны (n = 80), генофондные баранчики (n = 21) и генофондные ярочки (n = 34).

Мы использовали образцы ткани, ранее отобранные в Племенном заводе «Ладожский» – филиале ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста и депонированные в биоколлекции «Банк генетического материала домашних и диких видов животных и птицы» (зарегистрирован Минобрнауки РФ № 498808), созданной и поддерживаемой в ФГБНУ ФИЦ животноводства – ВИЖ им. академика Л.К. Эрнста.

При выполнении исследований мы использовали оборудование ЦКП «Биоресурсы и биоинженерия сельскохозяйственных животных» ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им Л.К. Эрнста.

Из выбранных образцов выделение ДНК производилось с помощью коммерческого набора «ДНК-Экстран-2» (ООО «Синтол», Россия) по стандартному протоколу производителя. Полимеразная цепная реакция проводилась в конечном объеме 15 мкл: 1,5 мкл реакционного буфера с MgCl₂, 1,5 мкл dNTPs, 0,4 мкл смеси праймеров, 0,08 мкл SmartAq ДНК полимеразы («Диалат Лтд.», Россия), 1 мкл ДНК. Амплификацию проводили в следующем температурно-временном режиме: 5 мин. при 95 °C (1цикл); 10 с. при 95 °C, 15 с. при 60 °C и 1 мин. при 72 °C (35 циклов); заключительный этап – 10 мин. при 72°C (1 цикл) (термоциклер Applied Biosystems SimpliAmp («Thermo-Fisher Scientific, Inc.», США). Рестрикция проводилась в конечном объеме 20 мкл: 7,5 мкл H₂O, 2 мкл Buffer Y, 0,5 мкл

эндонуклеазы рестрикции AluI (ООО «SibEnzyme»), 10 мкл амплифицированного ПЦР-продукта. Реакцию проводили в термостате при 37 °С.

Анализ полиморфизма гена инсулиноподобного фактора роста (*IGF-1*) у овец южной мясной породы проводили с помощью метода ПЦР-ПДФ с последующим разделением рестрицированных фрагментов в 2% агарозном геле, окрашенном бромидом димидиума, для идентификации генотипа. Генетико-статистический анализ результатов для оценки соответствия полученного распределения генотипов равновесию Харди-Вайнберга проведен в программе GenAlEx 6.503 [14, 15].

Результаты исследования. В рамках исследования полиморфизма ДНК-маркеров овец мы выполнили тестирование 135 овец южной мясной породы для выявления аллельных вариантов в гене *IGF-1*. При проведении молекулярного анализа овец южной мясной породы мы идентифицировали все аллельные варианты $IGF-1^{CC}$, $IGF-1^{CT}$, $IGF-1^{TT}$, которые приведены на рисунке.

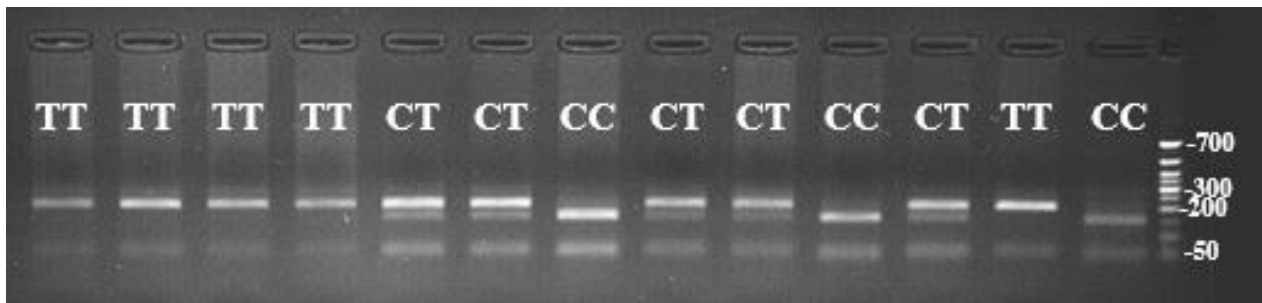


Рисунок. ПДФ-спектры ПЦР- продукта гена *IGF-1* с использованием рестрикционного фермента AluI у овец южной мясной породы: $IGF-1^{CC}$ (195 п.о и 70 п. о.), $IGF-1^{CT}$ (195, 70 и 265 п. о.), $IGF-1^{TT}$ (265 п. о.)

Figure. PDRF spectra of the PCR product of the *IGF-1* gene using the restriction enzyme AluI in sheep of the southern meat breed: $IGF-1^{CC}$ (195 bp. and 70 bp.), $IGF-1^{CT}$ (195, 70 and 265 bp.), $IGF-1^{TT}$ (265 bp.)

В данной работе мы изучали полиморфизм в гене *IGF-1*, обусловленный заменой С на Т. После реакции рестрикции с использованием рестрикционного фермента AluI были идентифицированы 3 генотипа: CC (195 и 70 п. о.), CT (195 п. о., 70 п. о. и 265 п. о.), и TT (265 п. о.). Результаты анализа частот встречаемости аллелей и генотипов гена *IGF-1* в популяции овец южной мясной породы приведены в таблице 1. Распределение генотипов находится в соответствии с равновесием Харди-Вайнберга.

**Таблица 1. Частота встречаемости аллелей и генотипов гена *IGF-1*
у исследованной выборке овец южной мясной породы**

Table 1. Frequency of alleles and genotypes of the *IGF-1* gene in the studied sample of sheep of the southern meat breed

Генотип	Число носителей (n=135)	Частота встречаемости генотипа, %	
		Фактическая*	Расчетная
$IGF-1^{CC}$	9	6,67	8,35
$IGF-1^{CT}$	60	44,44	41,09
$IGF-1^{TT}$	66	48,89	50,56

Примечание: * $\chi^2 = 0,902$, $df = 1$, $p > 0,342$ – различия между фактическими и расчетными частотами генотипов статистически не значимы.

Исследования выбранных групп овец южной мясной породы по данным полиморфизма гена *IGF-1* показали наличие всех трех генотипов $IGF-1^{CC}$, $IGF-1^{CT}$ и $IGF-1^{TT}$. В результате анализа выявлено, что ген *IGF-1* является полиморфным. Наибольшей частотой встречаемости характеризовался аллель Т (0,71%), который в гомозиготном состоянии выявлен у 66 (48,9%) особей, а в гетерозиготном – у 60 (44,45%) овец. Частота встречаемости аллеля С в общей выборке овец составила 0,29%, а генотипа СС – у 9 (6,7%) овец.

В таблице 2 приведены данные анализа частоты по группам животных. Частота встречаемости аллеля Т составила 0,70% у баранов, 0,69% у баранчиков и 0,73% у ярочек. Распределение генотипов в группе баранов находится в соответствии с равновесием Харди-Вайнберга. В связи с тем, что группы баранчиков и ярочек представлены малыми выборками, различия между фактическими и расчетными частотами генотипов для этих групп следует оценить с привлечением больших выборок.

Таблица 2. Частота встречаемости аллелей по группам животных
Table 2. Frequency of alleles and genotypes in the sheep groups

Группа овец	Генотип	Число носителей	Частота встречаемости генотипа, %	
			Фактическая*	Расчетная
Бараны (n = 80)	СС	4	5	8,63
	СТ	39	48,75	41,49
	ТТ	37	46,25	49,88
Баранчики (n = 21)	СС	1	4,77	9,58
	СТ	11	52,38	42,74
	ТТ	9	42,85	47,68
Ярочки (n = 34)	СС	4	11,77	7,01
	СТ	10	29,41	38,92
	ТТ	20	58,82	54,07

Примечание: *различия между фактическими и расчетными частотами генотипов статистически незначимы ($\chi^2 = 2,448$, $df = 1$, $p > 0,118$ – для баранов; $\chi^2 = 1,068$, $df = 1$, $p > 0,302$ – для баранчиков; $\chi^2 = 2,032$, $df = 1$, $p > 0,154$ – для ярочек).

Из таблицы 2 следует, что наибольшая частота встречаемости генотипа ТТ наблюдалась у группы генофондных ярочек (58,82%), а генотип СС встречался наиболее редко (с частотой 5%) в исследуемой группе генофондных баранов.

Выводы. В данной статье представлены результаты анализа полиморфизма гена инсулиноподобного фактора роста *IGF-1* у овец южной мясной породы. При оценке аллельных вариантов в гене *IGF-1* в популяции овец южной мясной породы выявлено три генотипа: СС, СТ и ТТ, при этом генотип ТТ преобладал в изучаемой популяции овец – 49%. Частота встречаемости аллеля Т была значительно выше, чем аллеля С: 0,715 и 0,285 соответственно.

Предварительные результаты изучения ассоциации гена-кандидата с продуктивными показателями овец в изучаемой популяции показывают, что применение генетического тестирования гена-маркера *IGF-1* позволяет использовать его для селекции овец с более высоким уровнем продуктивности. Таким образом, дальнейшие исследования в этой области

имеют прикладное значение, так как имеют перспективу для внедрения в селекционный процесс.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Abousoliman, I. et al. (2020) 'Analysis of Candidate Genes for Growth and Milk Performance Traits in the Egyptian Barki Sheep', *Animals*, vol. 10, no. 2, p. 197. DOI: 10.3390/ani10020197.
2. Kumar, S. et al. (2023) 'Influence of single nucleotide polymorphism in the IGF-1 gene on performance and conformation traits in Munjal sheep', *Zygote*, vol. 31, no. 1, pp. 70–77. DOI: 10.1017/s0967199422000545.
3. Luo, W.W. et al. (2021) 'Identifying Candidate Genes Involved in the Regulation of Early Growth Using Full-Length Transcriptome and RNA-Seq Analyses of Frontal and Parietal Bones and Vertebral Bones in Bighead Carp (*Hypophthalmichthys nobilis*)', *Frontiers in genetics*, no. 11, 603454. DOI: 10.3389/fgene.2020.603454.
4. Xu, S.S., Li, M.H. (2017) 'Recent advances in understanding genetic variants associated with economically important traits in sheep (*Ovis aries*) revealed by high-throughput screening technologies', *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, no. 4, pp. 25–34. DOI: 10.15302/J-FASE-2017151.
5. Valencia, C.P.L., Franco, L., Herrera, D.H. (2022) 'Association of single nucleotide polymorphisms in the CAPN, CAST, LEP, GH, and IGF-1 genes with growth parameters and ultrasound characteristics of the Longissimus dorsi muscle in Colombian hair sheep', *Tropical Animal Health And Production*, no. 54, p. 82. DOI: 10.1007/s11250-022-03086-x.
6. Shen, W. et al. (2003) 'Protein anabolic effects of insulin and IGF-I in the ovine fetus', *American Journal of Physiology, Endocrinology and Metabolism*, no. 284, pp. E748–E756. DOI: 10.1152/ajpendo.00399.2002.
7. Putra, D.E. (2017) 'Polymorphism of Insulin-like Growth Factor 1 Gene (IGF1/TasI, IGF1/SnaBI, IGF1/RsaI) and the Association with Daily Gain of Pesisir Cattle Local Breed from West Sumatera, Indonesia', *Pakistan Journal of Biological Sciences*, no. 20, pp. 210–216. DOI: 10.3923/pjbs.2017.210.216.
8. El-Magd, M.A. et al. (2013) 'Novel polymorphisms of the IGF1R gene and their association with average daily gain in Egyptian buffalo (*Bubalus bubalis*)', *Domestic Animal Endocrinology*, no. 45, pp. 105–110. DOI: 10.1016/j.domaniend.2013.06.004.
9. Wang, B. et al. (2019) 'Association of Twelve Candidate Gene Polymorphisms with the Intramuscular Fat Content and Average Backfat Thickness of Chinese Suhuai Pigs', *Animals*, no. 9, p. 858. DOI: 10.3390/ani9110858.
10. Lestari, D.A. et al. (2020), "Effect of insulin-like growth factor 1 gene on growth traits of Kejobong goat and its growth analysis", *Veterinary World*, no. 13, pp. 127–133. DOI: 10.14202/vetworld.2020.127-133.
11. Meira, A.N. et al. (2019) 'Single nucleotide polymorphisms in the growth hormone and IGF type-1 (IGF1) genes associated with carcass traits in Santa Ines sheep', *Animal*, no. 13, pp. 460–468. DOI: 10.1017/S1751731118001362.
12. Grochowska, E. et al. (2017) 'Effect of the IGF-I gene polymorphism on growth, body size, carcass and meat quality traits in Coloured Polish Merino sheep', *Archives Animal Breeding*, no. 60, pp. 161–173. DOI: 10.1017/S1751731118001362.
13. Negahdary, M., Hajihosseini, A., Ajdary, M. PCR-SSCP Variation of IGF1 and PIT1 Genes and Their Association with Estimated Breeding Values of Growth Traits in Makoei Sheep // *Genetics Research International*. – 2013. – № 2013. – P. 272346. DOI: 10.1155/2013/272346.

14. Peakall, R., Smouse, P.E. GenALEx 6.5: genetic analysis in Excel. Population genetic software for teaching and research-an update // *Bioinformatics*. – 2012. – Vol.28. – № 19. – Pp. 2537-2539. DOI.org/10.1093/bioinformatics/bts460.
15. Peakall, R., Smouse, P.E. GENALEX 6: genetic analysis in Excel. Population genetic software for teaching and research // *Molecular Ecology Notes*. 2006. Vol. 6. – № 1. – Pp. 288-295. DOI: 10.1111/j.1471-8286.2005.01155.x.

REFERENCES

1. Abousoliman, I. et al. (2020) ‘Analysis of Candidate Genes for Growth and Milk Performance Traits in the Egyptian Barki Sheep’, *Animals*, vol. 10, no. 2, p. 197. DOI: 10.3390/ani10020197.
2. Kumar, S. et al. (2023) ‘Influence of single nucleotide polymorphism in the IGF-1 gene on performance and conformation traits in Munjal sheep’, *Zygote*, vol. 31, no. 1, pp. 70–77. DOI: 10.1017/s0967199422000545.
3. Luo, W.W. et al. (2021) ‘Identifying Candidate Genes Involved in the Regulation of Early Growth Using Full-Length Transcriptome and RNA-Seq Analyses of Frontal and Parietal Bones and Vertebral Bones in Bighead Carp (*Hypophthalmichthys nobilis*)’, *Frontiers in genetics*, no. 11, 603454. DOI: 10.3389/fgene.2020.603454.
4. Xu, S.S., Li, M.H. (2017) ‘Recent advances in understanding genetic variants associated with economically important traits in sheep (*Ovis aries*) revealed by high-throughput screening technologies’, *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, no. 4, pp. 25–34. DOI: 10.15302/J-FASE-2017151.
5. Valencia, C.P.L., Franco, L., Herrera, D.H. (2022) ‘Association of single nucleotide polymorphisms in the CAPN, CAST, LEP, GH, and IGF-1 genes with growth parameters and ultrasound characteristics of the Longissimus dorsi muscle in Colombian hair sheep’, *Tropical Animal Health And Production*, no. 54, p. 82. DOI: 10.1007/s11250-022-03086-x.
6. Shen, W. et al. (2003) ‘Protein anabolic effects of insulin and IGF-I in the ovine fetus’, *American Journal of Physiology, Endocrinology and Metabolism*, no. 284, pp. E748–E756. DOI: 10.1152/ajpendo.00399.2002.
7. Putra, D.E. (2017) ‘Polymorphism of Insulin-like Growth Factor 1 Gene (IGF1/TasI, IGF1/SnaBI, IGF1/RsaI) and the Association with Daily Gain of Pesisir Cattle Local Breed from West Sumatera, Indonesia’, *Pakistan Journal of Biological Sciences*, no. 20, pp. 210–216. DOI: 10.3923/pjbs.2017.210.216.
8. El-Magd, M.A. et al. (2013) ‘Novel polymorphisms of the IGF1R gene and their association with average daily gain in Egyptian buffalo (*Bubalus bubalis*)’, *Domestic Animal Endocrinology*, no. 45, pp. 105–110. DOI: 10.1016/j.domaniend.2013.06.004.
9. Wang, B. et al. (2019) ‘Association of Twelve Candidate Gene Polymorphisms with the Intramuscular Fat Content and Average Backfat Thickness of Chinese Suhuai Pigs’, *Animals*, no. 9, p. 858. DOI: 10.3390/ani9110858.
10. Lestari, D.A. et al. (2020), “Effect of insulin-like growth factor 1 gene on growth traits of Kejobong goat and its growth analysis”, *Veterinary World*, no. 13, pp. 127–133. DOI: 10.14202/vetworld.2020.127-133.
11. Meira, A.N. et al. (2019) ‘Single nucleotide polymorphisms in the growth hormone and IGF type-1 (IGF1) genes associated with carcass traits in Santa Ines sheep’, *Animal*, no. 13, pp. 460–468. DOI: 10.1017/S1751731118001362.
12. Grochowska, E. et al. (2017) ‘Effect of the IGF-I gene polymorphism on growth, body size, carcass and meat quality traits in Coloured Polish Merino sheep’, *Archives Animal Breeding*, no. 60, pp. 161–173. DOI: 10.1017/S1751731118001362.
13. Negahdary, M., Hajhosseinlo, A., Ajdary, M. (2013) ‘PCR-SSCP Variation of IGF1 and PIT1 Genes and Their Association with Estimated Breeding Values of Growth Traits in

- Макоои Шейп’, *Genetics Research International*, no. 2013, pp. 272346. DOI: 10.1155/2013/272346.
14. Peakall, R., Smouse, P.E. (2012) ‘GenAlEx 6.5: genetic analysis in Excel. Population genetic software for teaching and research-an update’, *Bioinformatics*, vol. 28, no. 19, pp. 2537–2539. DOI.org/10.1093/bioinformatics/bts460.
15. Peakall, R., Smouse, P.E. (2006) ‘GENALEX 6: genetic analysis in Excel. Population genetic software for teaching and research’, *Molecular Ecology Notes*, vol. 6, no. 1, pp. 288–295. DOI: 10.1111/j.1471-8286.2005.01155.x.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Анастасия Дмитриевна Соловьева, младший научный сотрудник группы генетики и геномики мелкого рогатого скота, федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ им. академика Л.К. Эрнста, пос. Дубровицы, г.о. Подольск, Московская область, Россия; <https://orcid.org/0000-0003-2628-9554>, SPIN-код: 8501-6931; e-mail: anastastasiya93@mail.ru.

Денискова Татьяна Евгеньевна, кандидат биологических наук, руководитель группы генетики и геномики мелкого рогатого скота, федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика Л.К. Эрнста, пос. Дубровицы, г.о. Подольск, Московская область, Россия; <https://orcid.org/0000-0002-5809-1262>, SPIN-код: 2355-1312; e-mail: horarka@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anastasiya D. Solovyova, Junior Researcher, Group for Genetic and Genomics of Small Ruminants, L.K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry, Dubrovitsy settlement, Podolsk city district, Moscow Region, Russia; <https://orcid.org/0000-0003-2628-9554>, SPIN-code: 8501-6931; e-mail: anastastasiya93@mail.ru.

Tatiana E. Deniskova, Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, Group for Genetic and Genomics of Small Ruminants, L.K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry, Dubrovitsy settlement, Podolsk city district, Moscow Region, Russia; <https://orcid.org/0000-0002-5809-1262>, SPIN-code: 2355-1312; e-mail: horarka@yandex.ru.

Авторский вклад. Все авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении и анализе данного исследования. Все авторы настоящей статьи ознакомились и одобрили представленный окончательный вариант.

Author’s contribution. All authors of this research paper have directly participated in the planning, execution, or analysis of this study. All authors of this paper have read and approved the final version submitted.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Received 07.06.2024
Поступила после рецензирования / Revised 11.08.2024
Принята к публикации / Accepted 20.08.2024

Научная статья/Original article


УДК 636.2

Код ВАК 4.2.5

DOI: 10.24411/2078-1318-2024-3-106-116

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АНАЛИЗА D-ПЕТЛИ МИТОХОНДРИАЛЬНОЙ ДНК КРУПНОГО РОГАТОГО СКОТА ДЛЯ ОБРАЗЦОВ С ДЕГРАДИРОВАННОЙ ДНК

М.С. Форнара¹  , Н.Ф. Бакоев¹ 

¹Федеральный исследовательский центр животноводства – Всероссийский институт животноводства имени академика Л. К. Эрнста
пос. Дубровицы, Подольский р-н, Московская обл., Россия
 margaretfornara@gmail.com

Реферат. Генетическая характеристика пород позволяет оценить их разнообразие и изменчивость, что является основополагающим элементом при разработке стратегий разведения и планов сохранения генетических ресурсов. Митохондриальная ДНК (мтДНК) является уникальным маркером, который позволил прояснить эволюцию крупного рогатого скота, процессы одомашнивания и миграции. Митохондриальный геном в клетке, в отличие от ядерного, представлен несколькими тысячами копий, поэтому анализ митохондриальной ДНК широко используется при исследовании сложных образцов (найденных при археологических раскопках, сохраняемых в музейных и криминалистических коллекциях), в которых ДНК сильно деградирована. Целью нашей работы являлась разработка системы анализа полиморфизмов D-петли, пригодной для исследования таких образцов. В качестве биологического материала для разработки тест-системы были использованы экстракты ДНК, полученные из археологических образцов крупного рогатого скота, датированных XIII веком (n=8). Для амплификации области D-петли мтДНК(787 п.н.) археологических образцов КРС было подобрано три пары праймеров, перекрывающих друг друга. Для определения принадлежности исследуемых образцов КРС к известным гаплогруппам из базы NCBI были отобраны последовательности мтДНК крупного рогатого скота, относящиеся к гаплогруппам T1, T2, T3, T4, T5, Q, Q1, Q1a, Q2 R1, R2, P, I и C. Анализ медианной сети показал кластеризацию археологических образцов вблизи гаплогрупп T3 и T4, на ветви, сформированной гаплотипами, характерными для европейских пород. Тогда как азиатские гаплогруппы I (*Bos indicus*) и C (*Bos primigenius*, обнаруженный в Китае) сформировали отдельную ветвь.

Ключевые слова: КРС, древняя ДНК, митохондриальная ДНК, D-петля, гаплогруппа


Для цитирования: Форнара, М.С., Бакоев, Н.Ф. Разработка системы анализа D-петли митохондриальной ДНК крупного рогатого скота для образцов с деградированной ДНК // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2024. – № 3 (77). – С. 106–116. – DOI: 10.24411/2078-1318-2024-3-106-116.

Благодарности. Костные остатки крупного рогатого скота из археологических раскопок древнего Ярославля предоставлены сотрудниками Лаборатории естественнонаучных методов ИА РАН к.б.н. с.н.с. Е.Е. Антипиной и к.и.н. с.н.с. Л.В. Яворской в рамках Договора о сотрудничестве между Федеральным государственным бюджетным учреждением науки Институтом археологии Российской академии наук и Федеральным государственным бюджетным научным учреждением «Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика Л. К. Эрнста.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (тема FGGN-2024-0015).

DEVELOPMENT OF A BOVINE MITOCHONDRIAL D-LOOP ANALYSIS SYSTEM FOR SAMPLES WITH DEGRADED DNA

M.S. Fornara¹  , N.F. Bakoev¹ 

¹Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member L.K. Ernst
Dubrovitsy, Podolsk district, Moscow Region, Russia
 margaretfornara@gmail.com

Abstract. Genetic characterization of breeds allows assessment of their diversity and variability, which is a fundamental element in the development of breeding strategies and conservation plans for genetic resources. Mitochondrial DNA (mtDNA) is a unique marker that has provided insight into cattle evolution, domestication and migration. The mitochondrial genome in a cell, in contrast to the nuclear genome, is represented by several thousand copies, so analysis of mitochondrial DNA is widely used in the study of complex samples (found during archaeological excavations, preserved in museum collections, forensics) in which the DNA is highly degraded. The goal of our work was to develop a system for analyzing D-loop polymorphisms suitable for studying such samples. DNA extracts obtained from archaeological samples of cattle dating back to the 13th-14th centuries (n=8) were used as biological material for the development of the test system. Three overlapping primer pairs were selected to amplify the D-loop region of mtDNA (787 bp) of archaeological cattle samples. To determine whether the studied cattle samples belonged to known haplogroups, cattle mtDNA sequences belonging to haplogroups T1, T2, T3, T4, T5, Q, Q1, Q1a, Q2 R1, R2, P, I and C were selected from the NCBI database. Analysis of the median network showed clustering of archaeological samples near haplogroups T3 and T4, on a branch formed by haplotypes characteristic of European breeds. While the Asian haplogroups I (*Bos indicus*) and C (*Bos primigenius*, discovered in China) formed a separate branch.

Keywords: cattle, ancient DNA, mitochondrial DNA, D-loop, haplogroups

For citation: Fornara, M.S., Bakoev, N.F. (2024) 'Development of a bovine mitochondrial D-loop analysis system for samples with degraded DNA', *Izvestiya of Saint-Petersburg State Agrarian University*, vol. 77, no. 3, pp. 106–116. (In Russ.) DOI: 10.24411/2078-1318-2024-3-106-116.

Acknowledgements. Cattle bones from archaeological excavations of ancient Yaroslavl were provided by the staff of the Laboratory of Natural Science Methods of IA RAS, Ph.D. (Biology), Senior Researcher E.E. Antipina and Ph.D. (History), Senior Researcher L.V. Yavorskaya within the framework of the Agreement on Cooperation between Institute of Archaeology of Russian Academy of Sciences and Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member L.K. Ernst.

Financial support. The research was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation according to theme No. FGGN-2024-0015.

Введение. Генетическая характеристика пород позволяет оценить их разнообразие и изменчивость, что является основополагающим элементом при разработке стратегий разведения и планов сохранения генетических ресурсов. Благодаря развивающимся методам генотипирования и статистическим подходам генетическое разнообразие можно легко оценить на разных уровнях: от отдельного гена [1] до всего генома [2].

Молекулярные маркеры произвели революцию в способности характеризовать генетическую изменчивость и рационализировать искусственный отбор [3], поскольку они предоставляют информацию о каждом регионе генома, независимо от уровня экспрессии генов. Митохондриальная ДНК (мтДНК) является уникальным маркером, который демонстрирует цитоплазматическое наследование, т. е. генетическая информация передается следующим поколениям только по материнской линии. Этот тип наследования позволил прояснить эволюцию крупного рогатого скота, процессы одомашнивания и миграции [4].

Регион смещения (D-петля), характеризующийся высокополиморфными областями (гипервариабельные области I и II), оказался особенно информативным для объяснения происхождения многих видов домашнего скота [5], поскольку он эволюционирует гораздо быстрее, чем кодирующая область мтДНК [6, 7].

Митохондриальный геном в клетке, в отличие от ядерного, представлен несколькими тысячами копий [8]. Поэтому анализ митохондриальной ДНК широко используется при исследовании сложных образцов (найденных при археологических раскопках, сохраняемых в музейных и криминалистических коллекциях), в которых ДНК сильно деградирована [9].

Цель исследований – разработка системы анализа полиморфизмов D-петли, пригодной для исследования образцов с сильно деградированной ДНК для реконструкции филогенетических отношений современных и предковых популяций крупного рогатого скота.

Материалы и методы. В качестве биологического материала для разработки тест-системы были использованы экстракты ДНК, полученные из археологических образцов крупного рогатого скота, датированных XIII веком (n=8).

Исследование проводили на базе оборудования Центра коллективного пользования «Биоресурсы и биоинженерия сельскохозяйственных животных» ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л. К. Эрнста.

ДНК выделяли с использованием набора COrDIS «Экстракт» Декальцин в соответствии с рекомендациями производителя. Для амплификации области D-петли мтДНК археологических образцов КРС было подобрано три пары праймеров, перекрывающих друг друга, общей длиной 844 п.н. между позициями 15741-255 мтДНК. Праймеры были подобраны в соответствии с референсной последовательностью мтДНК КРС, представленной в базе Национального центра биотехнологической информации NCBI (GenBank: NC_006853.1) с помощью онлайн-ресурса Basic Local Alignment Search Tool (BLAST) (таблица 1).

Таблица 1. Последовательность праймеров для амплификации D-loop мтДНК исторической ДНК КРС

Table1. Primer sequences for D-loop mtDNA amplification of historical cattle DNA

	Последовательность	Позиция	G/C%	Размер ПЦР
1	F- 5` - CAG TCT CAC CAT CAA CCC CC - 3`	15741-15760	60	301
	R- 5` - GCT TGC TTA TAT GCA TGG GGC - 3`	16042-16022	52	
2	F- 5` - GGT AAT GTA CAT AAC ATT AAT G - 3`	15960-15981	27	374
	R- 5` - CGA GAT GTC TTA TTT AAG AGG - 3`	16334-16314	38	
3	F- 5` - TGA ATT TTA CCA GGC ATC TGG TTC C - 3`	16251-16274	42	341
	R- 5` - GGT GGT AGA TAT TTA AGG GGG AAA - 3`	255-232	42	

ПЦР амплификацию проводили на термоциклере Applied Biosystems SimpliAmp («Thermo-Fisher Scientific, Inc.», США) в конечном объеме 25 мкл, в том числе 2,5 мкл реакционного буфера (10X Taq Turbo буфер) («Евроген» Россия), 16,8 мкл H₂O, 2,5 мкл dNTPs, 1 мкл смеси праймеров 10пмоль, 0,2 мкл SmartTaq ДНК полимеразы («Диалат Лтд.», Россия), 1 мкл ДНК. Условия температурно-временного режима ПЦР были следующими: начальная денатурация (94 °С в течение 3 мин.); 94 °С в течение 10 с., 61 °С в течение 15 с., 72 °С в течение 45 с. (40 цикла); заключительная элонгация (72 °С в течение 7 мин.).

Очистку ампликонов проводили с использованием набора для очистки ДНК из реакционной смеси и агарозного геля Cleanup-Mini («Евроген» Россия). Секвенирование проводили методом Сэнгера. Выравнивания результатов секвенирования проводили на основе полной последовательности мтДНК (GenBank: NC_006853.1) с использованием программ BioEdit 7.2.

Расчеты и построение филогенетического дерева осуществляли методом максимального правдоподобия в программе MEGA X. Для определения принадлежности исследуемых образцов КРС к известным гаплогруппам из базы NCBI были отобраны последовательности мтДНК крупного рогатого скота, относящиеся к гаплогруппам T1, T2, T3, T4, T5, Q, Q1, Q1a, Q2 R1, R2, P, I и C (таблица 2).

Таблица 2. Номера последовательностей известных гаплогрупп КРС

Table 2. Sequence numbers of known cattle haplogroups

№ п/п	Гаплогруппы	№ NCBI
1	C	KF525852
2	I	FJ971088
3	P	MZ901407
4	Q	MZ901652
5	Q1	HQ184038
6	Q1a	HQ184035
7	Q2	HQ184033
8	R1	HQ184040
9	R2	HQ184045
10	T1	MZ901386
11	T2	KT184460
12	T3	MZ901744
13	T4	MN200841
14	T5	MZ901530

Результаты исследования. Для определения наилучших условий амплификации проводили градиентную ПЦР на приборе Labcycler (SensoQuest, Германия). Температура отжига праймеров варьировала от 56 до 67°С. Детекцию результатов ПЦР выполняли в 2% агарозном геле с использованием системы документации на геле Uvitec FireReader V10 imaging System (Cleaver scientific, Великобритания) (рисунки 1, 2). В результате была определена оптимальная температура, которая составила 61 °С.



Рисунок 1. Электрофореграмма результатов ПЦР-градиента в 2% агарозном геле трех праймеров. Градиент температур составляет 56-67 °С. М +100 bp – маркер молекулярного веса
Figure 1. Electrophoregram of PCR gradient results in a 2% agarose gel of three primers. The temperature gradient is 56-67 °С. М +100 bp – Molecular weight markers

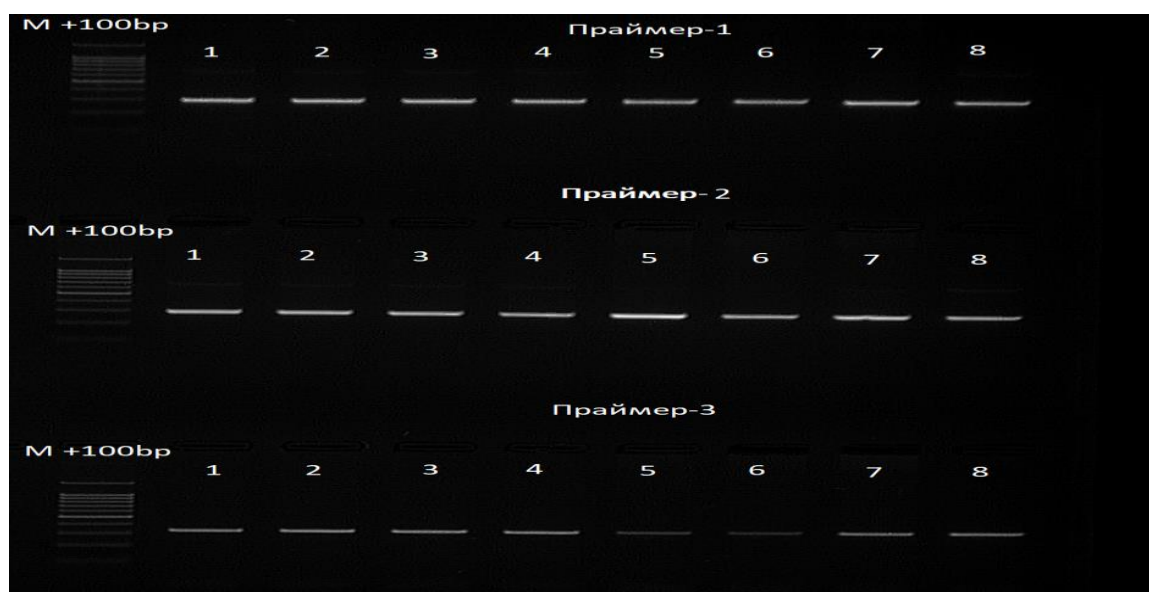


Рисунок 2. Электрофореграмма результатов ПЦР D-петли мтДНК археологических образцов, состоящей из 3-х пар праймеров, в 2% агарозном геле. М +100 bp – маркер молекулярного веса
Figure 2. Electrophoregram of mtDNA D-loop PCR results of archaeological samples consisting of three primer pairs in a 2% agarose gel. М +100 bp – Molecular weight markers

Результаты секвенирования ампликонов, полученных из трех пар праймеров, были выровнены на основе референсной последовательности GenBank: NC_006853.1 и соединены между собой (рисунки 3, 4, 5).

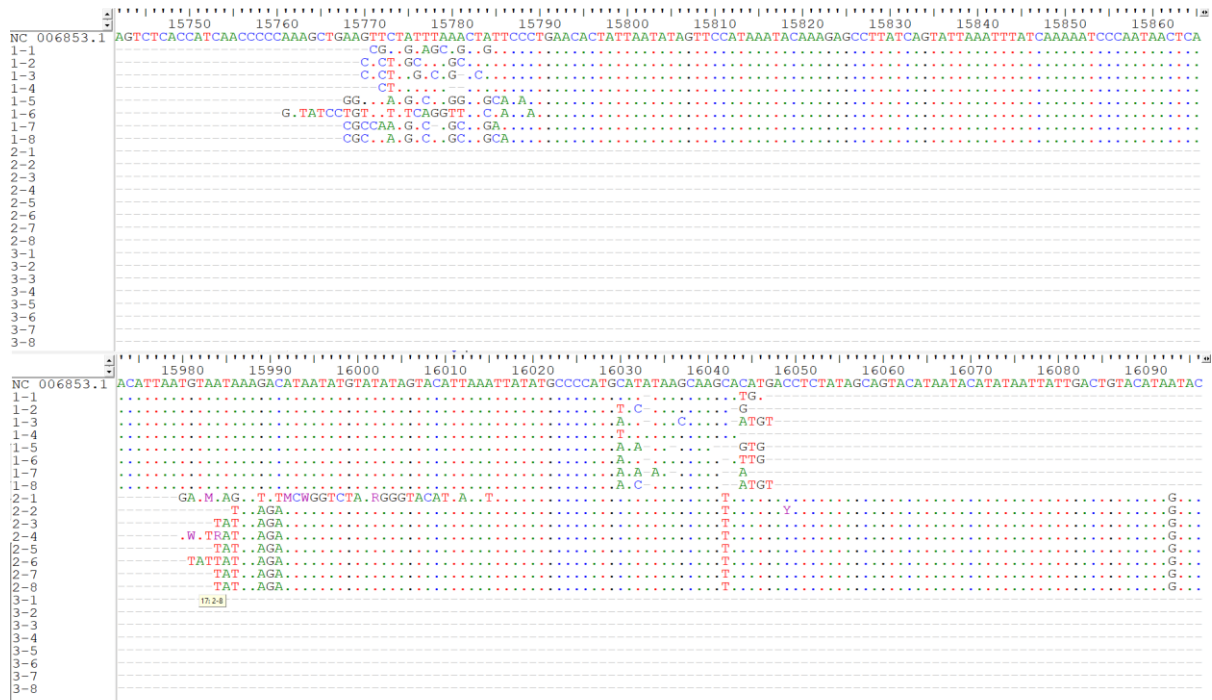


Рисунок 3. Результаты выравнивания последовательности секвенирования, начало первой пары праймеров и начало сиквенса второй пары праймеров
Figure 3: Sequence alignment results, the start of the first primer pair and the start of the sequencing of the second primer pair



Рисунок 4. Результаты выравнивания последовательности секвенирования конца второй пары праймеров и начало третьей пары праймеров
Figure 4: Sequence alignment results of the end of the second primer pair and the beginning of the third primer pair

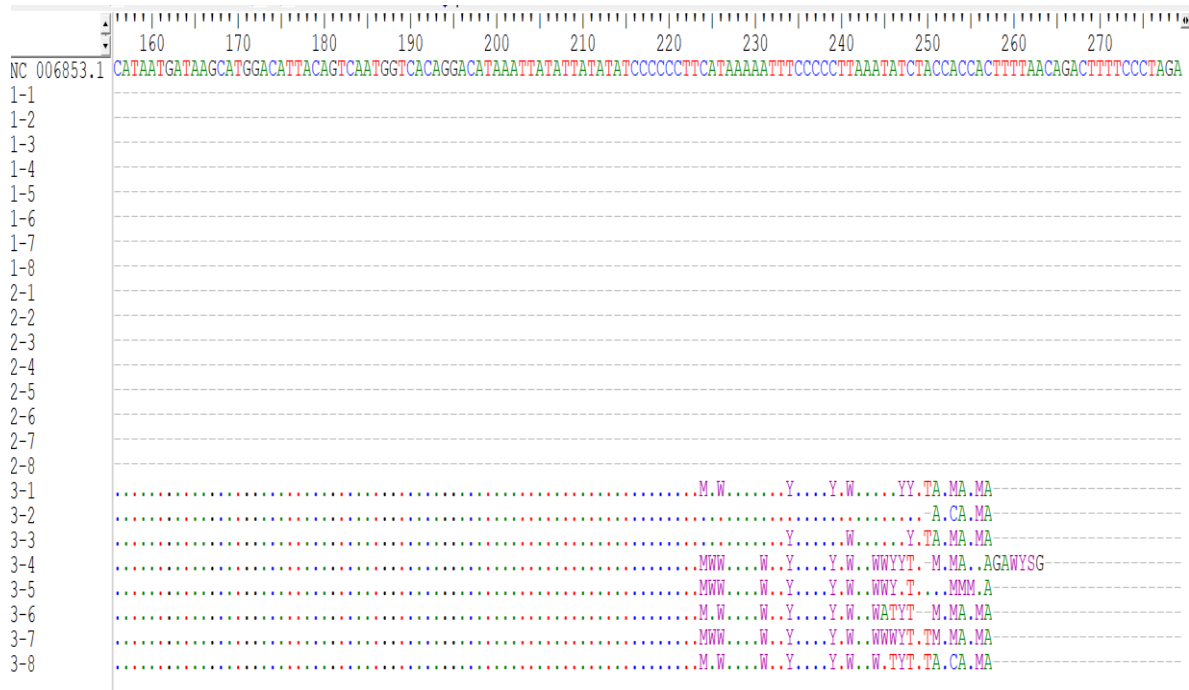


Рисунок 5. Результаты выравнивания последовательности секвенирования конца третьей пары праймеров

Figure 5. Results of sequence alignment of the end sequence of the third primer pair

Общая длина фрагмента после выравнивания и объединения результатов секвенирования трех пар праймеров составила 787 п.н., что позволило получить основную часть последовательности (с 1-го по 787 нуклеотид) D-петли мтДНК археологических образцов, расположенной между позициями 15790-220 мтДНК КРС.

Анализ филогенетического дерева (рисунок 6), построенного в программе MEGA X методом ML (максимального правдоподобия) выявил, что все исследуемые образцы были сгруппированы с представителями гаплогрупп T3 и T4, характерных для крупного рогатого скота Центральной и Северной Европы.

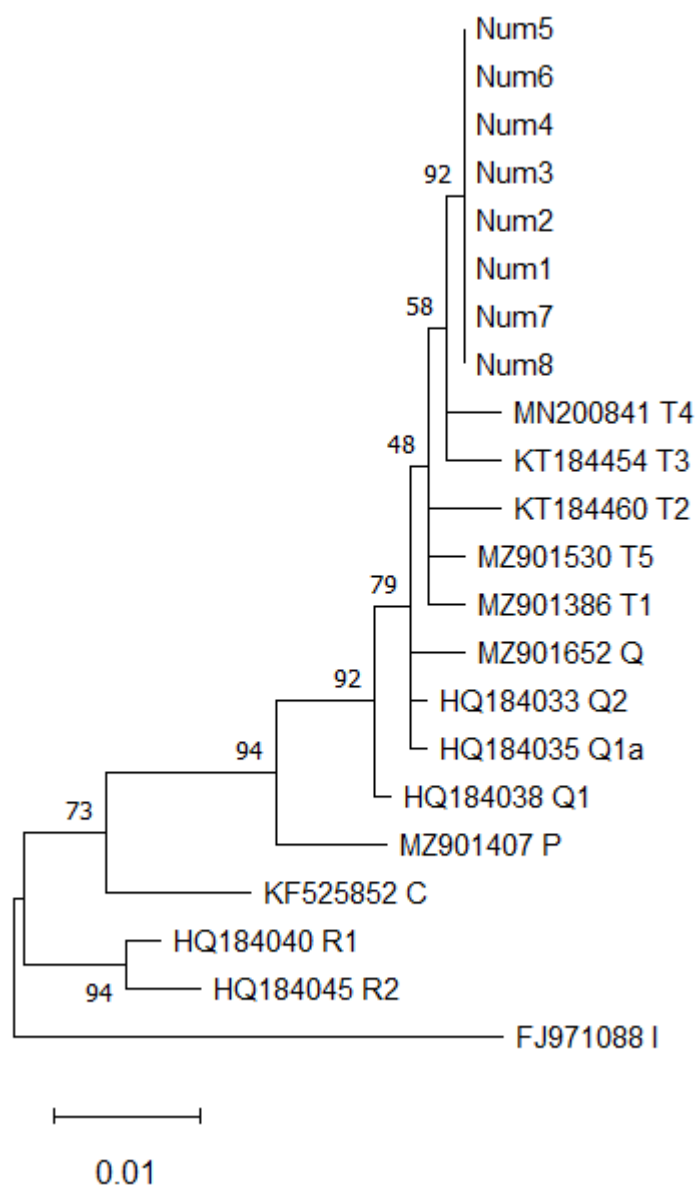


Рисунок 6. Филогенетическое дерево, построенное методом максимального правдоподобия.

Цифрами показана статистическая достоверность порядка ветвления, определенная с помощью «bootstrap»-анализа 100 альтернативных деревьев

Figure 6. Phylogenetic tree constructed by the maximum likelihood method. Numbers show the statistical significance of the branching order determined using bootstrap analysis of 100 alternative trees

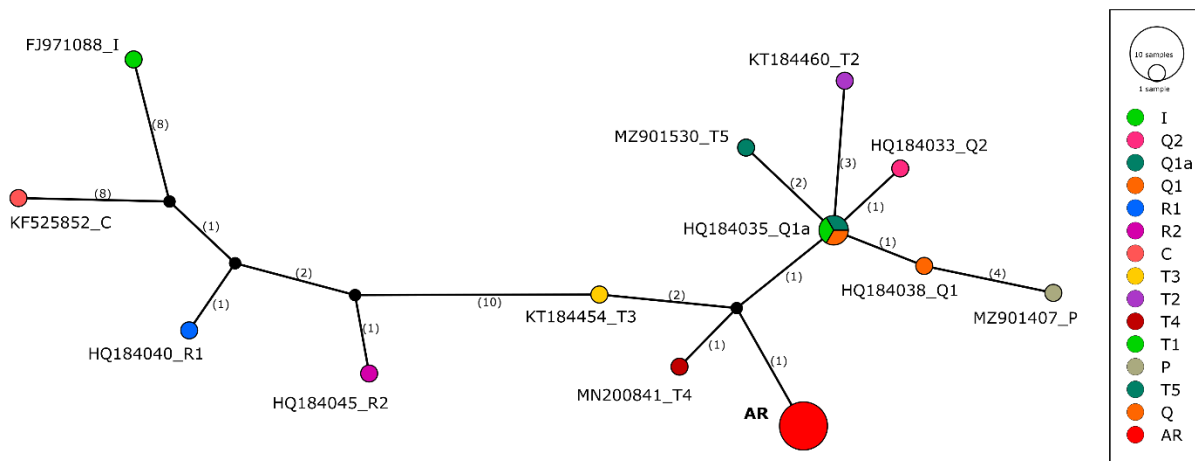


Рисунок 7. Медианная сеть гаплотипов крупного рогатого скота на основании последовательности участка D-петли. Цифры в скобках показывают количество нуклеотидных замен между группами

Figure 7. Median network of bovine haplotypes based on the sequence of the D-loop region. Numbers in parentheses show the number of nucleotide substitutions between groups

Анализ медианной сети (рисунок 7) показал кластеризацию археологических образцов вблизи гаплогрупп T3 и T4, на ветви, сформированной гаплотипами, характерными для европейских пород. Тогда как азиатские гаплогруппы I (*Bos indicus*) и C (*Bos primigenius*, обнаруженный в Китае) сформировали отдельную ветвь.

Проводимые ранее исследования древних образцов в основном были сосредоточены на амплификации небольших фрагментов мтДНК, гипервариабельных участков D-петли [10]. Исследования древних образцов крупного рогатого скота разных временных эпох, обнаруженных на территории Швейцарии, показали, что большинство из них относилось к общей европейской макрогаплогруппе T3. Однако для образцов периода неолита и бронзового века были выявлены гаплогруппы T1, T2, Q и P. Наименьшее генетическое разнообразие было обнаружено для образцов периода позднего железного века и V-VII веков нашей эры, что может отражать социально-экономические процессы тех времен [11]

Доступность технологий секвенирования позволила получать информацию из полных геномов. Полные митохондриальные геномы образцов крупного рогатого скота возрастом 4000 лет, обнаруженных на территории Северного Китая, были отнесены к гаплогруппе T3. Рост эффективной численности поголовья около 1900 лет назад позволяет предполагать, что крупный рогатый скот мог проникать в Китай по Шелковому пути, проложенному для связи с западной цивилизацией [12].

Выводы. Нами была разработана тест-система на основе 3 пар праймеров, которая позволила амплифицировать из археологических образцов основную часть D-петли мтДНК размером 787 п.н. На основании полученных последовательностей мтДНК может быть определена гаплогрупповая принадлежность археологических образцов, проведено сравнение с современными образцами разных пород крупного рогатого скота.

Таким образом, увеличение общей длины анализируемых фрагментов мтДНК не только позволяет получать информацию о гаплогрупповой принадлежности сложных образцов, но и дает возможность более точно восстанавливать историю и эволюцию видов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Al-Sharif M. et al. (2022) 'DNA polymorphisms of FGFBP1, leptin, κ -casein, and α s1-casein genes and their association with reproductive performance in dromedary she-camels', *Theriogenology*, vol. 178, pp.18-29. DOI: 10.1016/j.theriogenology.2021.11.001.
2. Kasarda R. et al. (2020) 'Fine-scale analysis of six beef cattle breeds revealed patterns of their genomic diversity', *Ital. J. Anim. Sci.*, vol. 19, pp. 1552–1567. DOI: 10.1080/1828051X.2020.1852894.
3. Giantsis I.A. et al. Origin, demographics, inbreeding, phylogenetics, and phenogenetics of Karamaniko breed, a major common ancestor of the autochthonous Greek sheep // *Trop. Anim. Health Prod.* 2022. – V. 54. –N. 73. DOI: 10.1007/s11250-022-03081-2
4. Zhang K., et al. Evolution and domestication of the Bovini species // *Animal Genetics.*- 2020. – V. 51 (5). – P. 635-843. DOI: 10.1111/age.12974
5. Sharma R. et al. // Microsatellite and mitochondrial DNA analyses unveil the genetic structure of native sheep breeds from three major agro-ecological regions of India // *Sci. Rep.* – 2020. -V.10. –N. 20422. DOI: 10.1038/s41598-020-77480-6
6. Galtier N. et al. (2009) 'Mitochondrial DNA as a marker of molecular diversity: a reappraisal', *Mol. Ecol.*, vol. 18, pp. 4541–50. DOI: 10.1111/j.1365-294X.2009.04380.x
7. Kusumaningrum, R., Sutopo S., Kurnianto E. (2020) 'Genetic diversity of Sragen Black Cattle based on D-Loop gene sequencing analysis', *Livest. Anim. Res*, vol. 18, pp. 124–131. DOI: 10.20961/lar.v18i2.42934.
8. Роль митохондриальной ДНК в патогенезе сердечно-сосудистых заболеваний / В. В. Киреева [и др.] // *Казанский мед. ж.* – 2022. – № 103 (3). – С. 455–466. DOI: 10.17816/KMJ2022-455.
9. Syndercombe Court D. (2021) 'Mitochondrial DNA in forensic use', *Emerg. Top. Life Sci.* – vol. 5(3), pp. 415-426. DOI: 10.1042/ETLS20210204
10. Ricaut F.X et al. (2006) 'Molecular genetic analysis of 400-year-old human remains found in two Yakut burial sites', *A. J. Ph. Anth.*, vol. 129(1), pp. 55–63, DOI: 10.1002/ajpa.20195.
11. Granado J. et al. (2023) 'The mtDNA D-Loop Legacy of Cattle: Fluctuations in Diversity from the Neolithic to Early Medieval Times in Switzerland', *Diversity*, vol. 15(5), p. 687. <https://doi.org/10.3390/d15050687>.
12. Zhang X. et al. (2021) 'Ancient Mitogenomes Reveal the Domestication and Distribution of Cattle During the Longshan Culture Period in North China', *Front Genet.*, vol. 12, P. 759827. DOI: 10.3389/fgene.2021.759827.

REFERENCES

1. Al-Sharif M. et al. (2022) 'DNA polymorphisms of FGFBP1, leptin, κ -casein, and α s1-casein genes and their association with reproductive performance in dromedary she-camels', *Theriogenology*, vol. 178, pp.18–29. DOI: 10.1016/j.theriogenology.2021.11.001.
2. Kasarda R. et al. (2020) 'Fine-scale analysis of six beef cattle breeds revealed patterns of their genomic diversity', *Ital. J. Anim. Sci.*, vol. 19, pp. 1552–1567. DOI: 10.1080/1828051X.2020.1852894.
3. Giantsis I.A. et al. Origin, demographics, inbreeding, phylogenetics, and phenogenetics of Karamaniko breed, a major common ancestor of the autochthonous Greek sheep // *Trop. Anim. Health Prod.* 2022. – V. 54. –N. 73. DOI: 10.1007/s11250-022-03081-2.
4. Zhang K. et al. (2020) 'Evolution and domestication of the Bovini species', *Animal Genetics*, vol. 51, no. 5, pp. 635-843. DOI: 10.1111/age.12974.
5. Sharma R. et al. (2020) 'Microsatellite and mitochondrial DNA analyses unveil the genetic structure of native sheep breeds from three major agro-ecological regions of India', *Sci. Rep.*, vol. 10, no. 20422. DOI: 10.1038/s41598-020-77480-6.

6. Galtier N. et al. (2009) 'Mitochondrial DNA as a marker of molecular diversity: a reappraisal', *Mol. Ecol.*, vol. 18, pp. 4541–50. DOI: 10.1111/j.1365-294X.2009.04380.x
7. Kusumaningrum, R., Sutopo S., Kurnianto E. (2020) 'Genetic diversity of Sragen Black Cattle based on D-Loop gene sequencing analysis', *Livest. Anim. Res.*, vol. 18, pp. 124–131. DOI: 10.20961/lar.v18i2.42934.
8. Kireeva, V.V., et al. (2022) 'The role of mitochondrial DNA in the pathogenesis of cardiovascular diseases', *Kazan m. J.*, no. 103(3), pp. 455–466. DOI: 10.17816/KMJ2022-455.
9. Syndercombe Court D. (2021) 'Mitochondrial DNA in forensic use', *Emerg. Top. Life Sci.* – vol. 5(3), pp. 415-426. DOI: 10.1042/ETLS20210204.
10. Ricaut F.X et al. (2006) 'Molecular genetic analysis of 400-year-old human remains found in two Yakut burial sites', *A. J. Ph. Anth.*, vol. 129(1), pp. 55–63, DOI: 10.1002/ajpa.20195.
11. Granado J. et al. (2023) 'The mtDNA D-Loop Legacy of Cattle: Fluctuations in Diversity from the Neolithic to Early Medieval Times in Switzerland', *Diversity*, vol. 15(5), p. 687. <https://doi.org/10.3390/d15050687>.
12. Zhang X. et al. (2021) 'Ancient Mitogenomes Reveal the Domestication and Distribution of Cattle During the Longshan Culture Period in North China', *Front Genet.*, vol. 12, P. 759827. DOI: 10.3389/fgene.2021.759827.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Маргарет Сержевна Форнара, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник группы генетики и геномики мелкого рогатого скота, Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика Л. К. Эрнста, пос. Дубровицы, Подольский р-н, Московская обл., Россия; <https://orcid.org/0000-0002-8844-177X>, SPIN-код: 7830-8548; e-mail: margaretfornara@gmail.com.

Некруз Фарходович Бакоев, кандидат сельскохозяйственных наук, научный сотрудник лаборатории ДНК технологий в животноводстве, Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика Л. К. Эрнста, пос. Дубровицы, Подольский р-н, Московская обл., Россия; <https://orcid.org/0000-0001-5495-8191>, SPIN-код: 5485-0959; e-mail: nekruz82@bk.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Margaret S. Fornara, Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, Small ruminant genetics and genomics group, L.K. Ernst Federal Science Center for Animal Husbandry, Dubrovitsy, Podolsk district, Moscow Region, Russia; <https://orcid.org/0000-0002-8844-177X>, SPIN-code: 7830-8548; e-mail: margaretfornara@gmail.com.

Nekruz F. Bakoev, Cand. Sci. (Agric.), Researcher, Laboratory of DNA technologies in animal husbandry, L.K. Ernst Federal Science Center for Animal Husbandry, Dubrovitsy, Podolsk district, Moscow Region, Russia; <https://orcid.org/0000-0001-5495-8191>, SPIN-code: 5485-0959; e-mail: nekruz82@bk.ru.

Авторский вклад. Все авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении и анализе данного исследования. Все авторы настоящей статьи ознакомились и одобрили представленный окончательный вариант.

Author's contribution. All authors of this research paper have directly participated in the planning, execution, or analysis of this study All authors of this paper have read and approved the final version submitted.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Received 19.06.2024
Поступила после рецензирования / Revised 03.09.2024
Принята к публикации / Accepted 04.09.2024

Научная статья/Original article

УДК 62.1.43.03

Код ВАК 4.3.1


DOI: 10.24411/2078-1318-2024-3-117-127

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ НАСОС-ФОРСУНКИ НЕUI С КОЛЬЦЕВЫМ УПРАВЛЯЮЩИМ КЛАПАНОМ

Ф.З. Габдрафиков¹ , Д.Д. Харисов¹  

¹Башкирский государственный аграрный университет

г. Уфа, Россия

 kharisov777@mail.ru


Реферат. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения технических и экономических показателей работы энергетических установок тракторов и комбайнов с учетом реальных условий эксплуатации. Одним из направлений повышения показателей работы дизельных энергоустановок является увеличение давления и интенсивности впрыскивания топлива в их камеру сгорания. Высокие давления впрыскивания обеспечивают системы топливоподачи с насос-форсунками. В таких системах насосный плунжер и топливная форсунка смонтированы в одном узле, что положительно сказывается на характеристиках впрыска и ресурсе распылителя. Широкое применение получили насос-форсунки НЕUI, позволяющие достичь экономичную работу дизельных двигателей, но имеющие и недостатки, связанные прежде всего с инерционностью управляющего клапана. Целью исследования является усовершенствование управляющего клапана насос-форсунки НЕUI для повышения его быстродействия путем внедрения упругого разрезного кольца. Скорость движения и надежность работы кольцевого управляющего клапана зависят от перемещения кольца h в зоне уплотнения канала подвода рабочей жидкости (масла) и герметичности перекрытия скользящей кромкой кольца сливного канала при перемещении на величину $\pi \cdot h$. Перемещение кольца определяется конструктивными размерами разрезного кольца и диаметром внутренней поверхности корпуса управляющего клапана. Получено математическое выражение, на основе разработанной модели функционирования кольцевого управляющего клапана, позволившее установить оптимальные параметры кольца для обеспечения быстродействия управления впрыскиванием топлива насос-форсункой. Обоснованы параметры электромагнита управляющего клапана. Проведенные на насос-форсунке НЕUI исследования с усовершенствованным управляющим клапаном показали, что повышается быстродействие управления топливоподачей за счет нового технического эффекта механического мультипликатора (благодаря конструкции кольца, свободная кромка которого в π раз быстрее перемещается, чем его ход).

Ключевые слова: насос-форсунка, кольцевой управляющий клапан, электронное управление, математическая модель, ход клапана

Для цитирования: Габдрафиков, Ф.З., Харисов, Д.Д. Усовершенствование насос-форсунки Неui с кольцевым управляющим клапаном // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2024. – № 3 (77). – С. 117–127. – DOI: 10.24411/2078-1318-2024-3-117-127.

HEUI PUMP-INJECTOR UNIT IMPROVEMENT
WITH RING CONTROL VALVEF.Z. Gabdrafikov¹ , D.D. Kharisov¹  ¹Bashkir State Agrarian University

Ufa, Russia

 kharisov777@mail.ru

Abstract. The relevance of the research is determined by the need to improve the technical and economic performance of power plants of tractors and combines taking into account the real operating conditions. One of the directions of improving the performance of diesel power units is to increase the pressure and intensity of fuel injection into their combustion chamber. High injection pressures are provided by fuel supply systems with pump-injector units. In such systems, the pump plunger and fuel injector unit are mounted in one unit, which has a positive effect on injection characteristics and atomiser life. HEUI pump-injector units are widely used, which allow to achieve economical operation of diesel engines, but have disadvantages, primarily due to the inertia of the control valve. The purpose of the study is to improve the control valve of the HEUI pump-injector unit by introducing an elastic split ring. The speed of movement and reliability of operation of the annular control valve depend on the movement of the ring in the sealing zone of the working fluid (oil) inlet channel and tightness of overlapping of the drain channel by the sliding edge of the ring when moving by the value $\pi \cdot h$. The ring displacement is determined by the design dimensions of the split ring and the diameter of the inner surface of the control valve body. The mathematical expression based on the developed model of the ring control valve functioning was obtained, which allowed to establish the optimal parameters of the ring to ensure fast control of fuel injection by the pump-injector unit. The parameters of the control valve electromagnet are substantiated. The researches carried out on the HEUI pump-injector units with the improved control valve have shown that the fuel supply control speed increases due to the new technical effect of the mechanical multiplier (due to the design of the ring, the free edge of which moves π times faster than its stroke).

Keywords: pump-injector unit, ring control valve, electronic control, mathematical model, valve stroke

For citation: Gabdrafikov, F.Z. and Kharisov, D.D. (2024) 'Heui pump-injector unit improvement with ring control valve', *Izvestiya of Saint-Petersburg State Agrarian University*, vol. 77, no. 3, pp. 117–127. (In Russ.) DOI: 10.24411/2078-1318-2024-3-117-127.

Введение. Для получения в энергетических установках тракторов и комбайнов высоких технических и экономических показателей с учетом их условий эксплуатации необходимо в том числе обеспечение в большом диапазоне нагрузок высокой интенсивности и давления впрыскивания топлива в камеру сгорания.

Этой проблемой занимаются многие отечественные и зарубежные ученые и известные фирмы-производители топливной аппаратуры. В исследовании Ф.З. Габдрафикова [1] повышение давления впрыска осуществляется за счет изменения закона движения толкателя совершенствованием кулачка. В работе [2] предлагается регулирование давления топливоподачи электронно-управляемым кольцевым клапаном. В исследованиях Тао Циу [3] задача решается путем оптимизации кулачка. В научной работе D. Qain [4] предлагается повышать давление впрыска топлива в дизельных двигателях совершенствованием газораспределительного механизма и клапана.

Метод форсированного впрыска топлива для малолитражных дизелей предлагается исследователем Е.А. Salykin [5]. В работе Miloljub S. [6] разработана математическая модель процесса впрыска топлива и выявлены основные параметры, влияющие на него.

В работе Zhao J. и Grekhov L. [7] представлены результаты разработки систем топливоподачи аккумуляторного типа с электронным управлением, способных работать при высоких давлениях (до 400 МПа).

Высокие давления впрыска топлива (до 140 МПа) обеспечивают новые системы топливоподачи с насос-форсунками, разработкой которых занимаются фирмы Bosch, Denso, Delphi, Cummin, Zexel и др.

В таких системах насосный плунжер и топливная форсунка смонтированы в одном узле. Отсутствие отдельного топливопровода способствует улучшению процесса топливоподачи благодаря уменьшению объема сжимаемого топлива, четкой отсечке подачи и отсутствию последующих его подвпрысков, уменьшению количества деталей топливной системы и увеличению ресурса распылителя.

Для управления процессом подачи топлива в современных насос-форсунках стали применяться быстродействующие электромагнитные клапаны с электронным управлением, которые обеспечивают своевременное начало и окончание впрыска топлива, закон и количество подачи топлива в зависимости от нагрузки на двигатель и частоты вращения коленчатого вала.

По данным фирмы Cummins и ряда других исследований, наиболее перспективными являются насос-форсунки дизеля с электронным управлением гидроприводом плунжера (Hydraulically actuated Electronically controlled Unit Injection – HEUI).

Система HEUI позволяет достичь экономичной работы дизеля, но имеет и недостаток, связанный с низкой надежностью в условиях эксплуатации в сельском хозяйстве из-за инерционности управляющего клапана. Фирма Caterpillar отмечает и ограниченность насос-форсунок HEUI по цикловой подаче.

Над совершенствованием системы топливоподачи с насос-форсункой HEUI работали Xuan-Thien Tran [8], Coldren D., Schuricht S., Smith R. [9], Zhu X. [10], Edwin Puente [11] и др.

Целью исследования является усовершенствование управляющего клапана насос-форсунки HEUI для получения быстродействия управлением впрыскивания топлива с разработкой конструкции и математическим описанием его работы.

Материалы, методы и объекты исследования. Для реализации вышеуказанной цели мы провели усовершенствование конструкции управляющего клапана путем внедрения упругого разрезного кольца. При электронном управлении сигналами от датчиков создается напряжение на обмотках электромагнита 3, и как следствие появляется магнитная сила, притягивающая разрезное кольцо 2. Тогда канал *A* и надпоршневая полость *B* соединяются. Кромка разрезного кольца 2, перемещаясь на величину $\pi \cdot h$, перекрывает при этом канал слива *C* (рисунок 1). Управляющая жидкость (масло), поступающая по каналу *A* под давлением, перемещает поршень 5 и плунжер 6 вниз и сжимает топливо в подигольной полости. Осуществляется впрыскивание топлива в камеру сгорания.

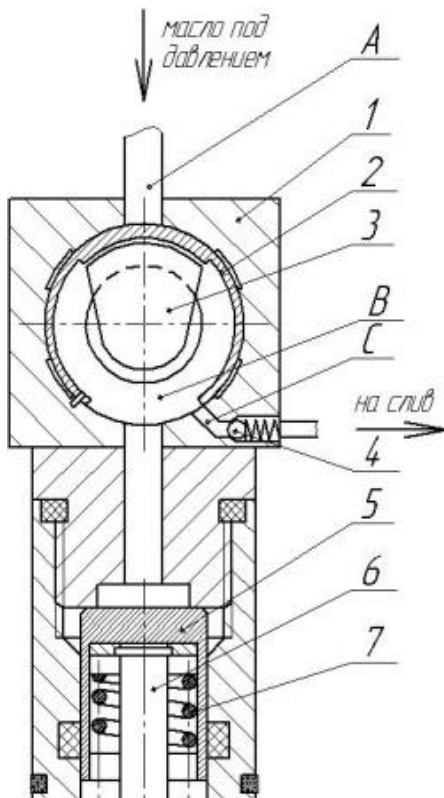


Рисунок 1. Насос-форсунка с кольцевым управляющим клапаном: 1 – корпус клапана; 2 – разрезное кольцо клапана; 3 – электромагнит; 4 – клапан для слива масла; 5 – поршень; 6 – плунжер; 7 – пружина; A – канал для подачи масла; B – полость; C – канал слива масла

Picture 1. Injector pump unit with ring control valve: 1 – valve body; 2 – split valve ring; 3 – electromagnet; 4 – valve for draining oil; 5 – piston; 6 – plunger; 7 – spring; A – channel for oil supply; B – cavity; C – oil drain channel

Впрыск топлива прекращается отключением напряжения на концах обмотки электромагнита 3. При этом разрезное кольцо 2 за счет своей упругости прижимается к поверхности корпуса клапана и перекрывает канал A. Полость B соединяется со сливным каналом C, и давление управляющей жидкости (масла) в полости B падает. Пружина 7 возвращает нагнетательный поршень 5 и плунжер 6 в исходное положение.

Пружина 7 возвращает нагнетательный поршень 5 и плунжер 6 в исходное положение.

Скорость движения и надежность работы управляющего кольцевого клапана зависят от перемещения разрезного кольца h в зоне уплотнения канала A (рисунок 1) и герметичности перекрытия скользящей кромкой кольца сливного канала C при перемещении на величину $\pi \cdot h$. Указанные параметры определяются конструктивными размерами разрезного кольца и диаметром внутренней поверхности корпуса управляющего клапана.

Для определения оптимальных размеров управляющего кольцевого клапана, обеспечивающих наиболее высокий подъем, было получено математическое выражение с учетом баланса сил, влияющих на него:

$$P_1 + P_2 = p_{рад} \cdot D \cdot b, \quad (1)$$

где $p_{рад}$ – давление радиальное от разрезного кольца на корпус, Па;

D, b – диаметр и ширина разрезного кольца, мм;

P_1 – сила давления от жидкости статическое, Н;

P_2 – сила гидродинамическая (от потока жидкости), Н.

После получения выражений для определения сил, действующих на кольцевой управляющий клапан, с использованием уравнения Навье-Стокса для движения жидкости и неразрывности потока, ряда математических преобразований и обоснований было получено выражение для определения хода кольца [1]:

$$h = \sqrt[3]{\frac{3\mu Q \left(b^2 + 2d_k^2 \ln \frac{b}{d_k} \right)}{4k\sigma}}, \quad (2)$$

где Q – расход управляющей жидкости, м³/с;

μ – вязкость динамическая, Па·с.

d_k – диаметр канала для подвода управляющей жидкости, мм;

k – жесткость разрезного кольца, Н/мм;

σ – конструктивная разница диаметра разрезного кольца и его корпуса, мм.

Если выразить жесткость кольца k из соотношения баланса сил, то получим

$$k\sigma = p_{рад} bD. \quad (3)$$

После подстановки выражения для определения $p_{рад}$ в уравнение (3) получим

$$k = \frac{2Et^3b}{3D^3}, \quad (4)$$

где E – модуль упругости материала разрезного кольца, кН/м²;

t – толщина поперечного сечения разрезного кольца в рабочей зоне, мм.

С учетом выражений (2) и (4) получаем уравнение хода разрезного кольца:

$$h = \frac{D}{2t} \sqrt[3]{\frac{9\mu Q \left(b + 2 \frac{d_k^2}{b} \ln \frac{b}{d_k} \right)}{\sigma E}}. \quad (5)$$

Как видно, на величину хода оказывают влияние конструктивные размеры: D – диаметр кольца, b – ширина кольца, t – толщина кольца; d_k – диаметр канала подвода жидкости; Q – расход жидкости.

По уравнению (5) были проведены теоретические исследования по выявлению оптимального размера кольцевого управляющего клапана. Были приняты величины, влияющие на жесткость кольца, k – это наружный диаметр D , ширина b и толщина t кольца клапана, а также диаметр канала подвода жидкости d_k . Граничные условия задаваемых размеров зависели от габаритного размера насос-форсунки.

Определение мощности электромагнита во внутриклапанной полости было осуществлено по силам, действующим со стороны разрезного кольца. Такими силами являются силы упругости $F_{упр}$ кольца, трения покоя и трения скольжения его о поверхность корпуса $F_{мп}$, а также силы давления масла $F_{ом}$ в канале A и во внутриклапанной полости B (рисунок 2). Незначительными силами гидравлического и магнитного залипания кольца о поверхность корпуса и электромагнита и силой инерции решено пренебречь.

Противодействующие силы определяются текущим значением хода (h) кольца и могут быть описаны системой уравнений

$$F_n = \begin{cases} F_{ом} = P_2 \cdot L_1 \cdot b - P_1 \cdot \frac{\pi \cdot d_o^2}{4}, \\ F_{мп} = \begin{cases} 0,708 \cdot E \cdot \xi_0 \cdot \frac{\lambda \cdot L_2 \cdot b \cdot t^3}{(D-t)^3}, \\ 0,708 \cdot E \cdot \xi \cdot \frac{\lambda \cdot L_2 \cdot b \cdot t^3}{(D-t)^3}, \end{cases} \\ F_{упр} = 1,417 \cdot E \cdot \frac{t^3 \cdot b \cdot (\sigma + h)}{(D-t)^3}. \end{cases} \quad (6)$$

где P_1 – давление со стороны канала A подвода жидкости, Па;

P_2 – давление жидкости в полости B клапана, Па;
 L_1 – размер зоны уплотнения подающего канала A , мм;
 L_2 – размер зоны уплотнения сливного канала C , мм;
 λ – центральный угол разреза кольца, рад (рисунок 2);
 E – модуль упругости разрезного кольца, кН/м²;
 ξ_0 и ξ – коэффициенты трения при покое и скольжении;
 σ и h – предварительный затяг (дополнительное сжатие разрезного кольца при посадке его в корпус) и величина хода кольца, мм.

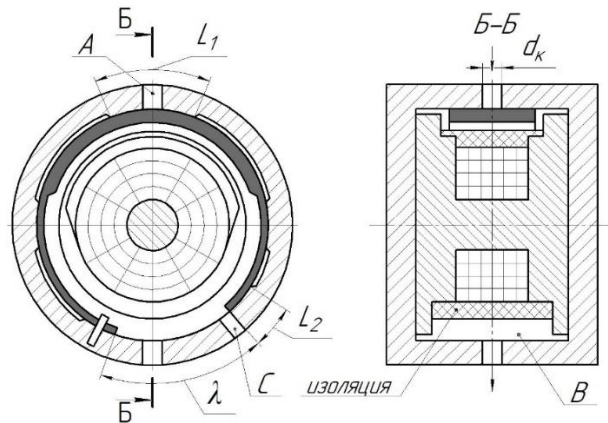


Рисунок 2. Схема кольцевого управляющего клапана: C и A – каналы сливной и топливоподводящий; B – внутриклапанная полость; λ – центральный угол разреза кольца; L_1 и L_2 – размеры зон уплотнения, подающего и сливного каналов

Picture 2. Ring control valve diagram: C and A – drain and fuel supply channels; B – intravalvular cavity; λ – central cutting angle of the ring; L_1 and L_2 – dimensions of the sealing areas of the supply and drain

С использованием системы уравнений (6) была рассчитана противодействующая электромагниту сила в случае $\xi_0 = 0,12$; $\xi = 0,10$; $\sigma = 0,15$ мм, $\lambda = 0,655$ рад; $L_1 = 6$ мм, $L_2 = 4$ мм, $E = 210$ кН/м², при зазоре между разрезным кольцом и сердечником 0,4 мм. Остаточное давление жидкости во внутриклапанной полости $P_2 = 0,2$ МПа, давление в канале A принималось равным нулю.

Расчеты показали существенное влияние диаметра D и толщины t кольца на силу. Принимая из расчетных данных диаметр $D = 20$ мм, ширину $b = 10$ мм, выполнили расчеты при различных толщинах и положениях кольца (рисунок 3).

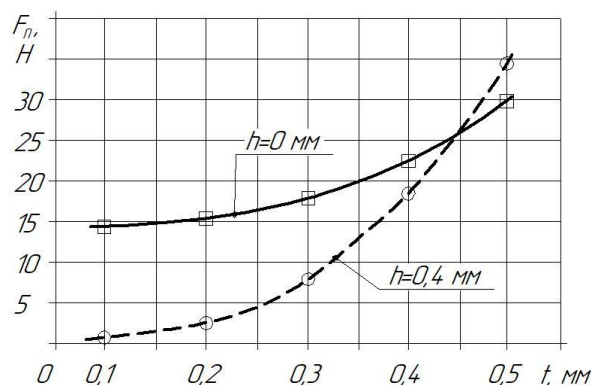


Рисунок 3. Зависимость противодействующей электромагниту силы от толщины кольца

Picture 3. Dependence of the force opposing the electromagnet on the ring thickness

Как видно, противодействующая сила при $h = 0$ мм (кольцо прижато к корпусу) оказывается большей и возрастает с увеличением толщины кольца (возрастают упругость и жесткость кольца). Так, при $h = 0,4$ мм (кольцо прижато к электромагниту) сила противодействующая без учета силы давления топлива оказывается значительно меньше при толщине кольца до 0,45 мм.

Результаты исследования. На рисунке 4 приведены результаты расчетных и экспериментальных исследований. Они показали высокую сходимость данных.

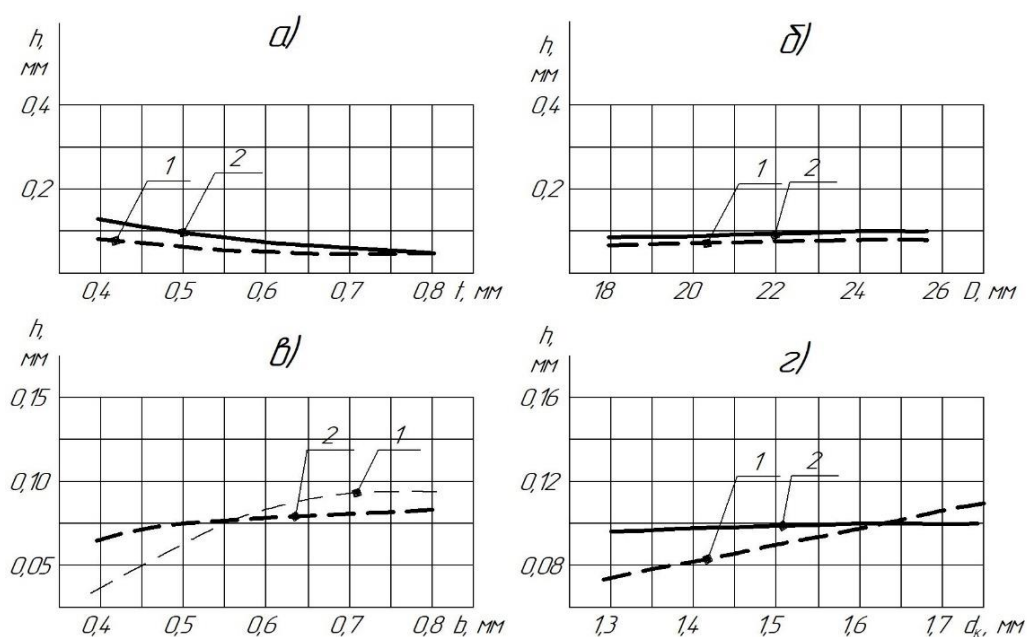


Рисунок 4. Экспериментальные (после аппроксимации) 1 и расчетные 2 зависимости хода разрезного кольца: от толщины (а), диаметра (б), ширины (в) разрезного кольца и диаметра подводящего канала (г)

Picture 4. Experimental (after approximation) 1 and calculated 2 dependencies of the stroke of the split ring: on thickness (a), diameter (б), width (c) of the split ring and diameter of the supply channel (г)

Наилучший результат хода разрезного кольца (0,14 мм) при работе от давления жидкости был получен при его диаметре 20 мм, ширине 10 мм, толщине 0,4 мм и диаметре канала 3 мм.

При электронном управлении надежность работы электромагнита обеспечивается превышением силы его притяжения над противодействующими силами.

Для определения оптимальных параметров электромагнита были проведены расчеты с использованием программы моделирования электромагнитных задач – ELCUT. Расчетами решалась осесимметричная задача модели магнитного нестационарного поля в декартовых координатах при зазоре 0,4 мм между якорем (разрезным кольцом) и сердечником электромагнита (электрическая схема для расчетов приведена на рисунке 5, где UI – источник питания постоянного тока).

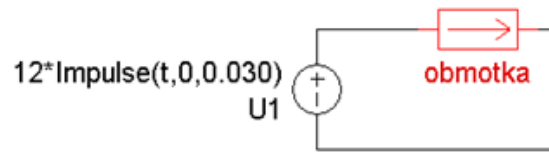


Рисунок 5. Расчетная электрическая схема
 Picture 5. Electrical design diagram

При решении данной задачи выполнена серия расчетов с импульсами напряжения на обмотке электромагнита в диапазоне 6–48 В длительностью 30 мс при различной толщине разрезного кольца и постоянных значениях его диаметра и ширины $D = 20$ мм, $b = 10$ мм. Расчеты показали, что выполнение обмотки поперечным сечением провода $0,312$ мм² и при 100 витках является оптимальным для получения максимальной силы притяжения.

Результаты программного расчета и экспериментального определения силы притяжения электромагнита при указанных выше условиях показаны на рисунке 6.

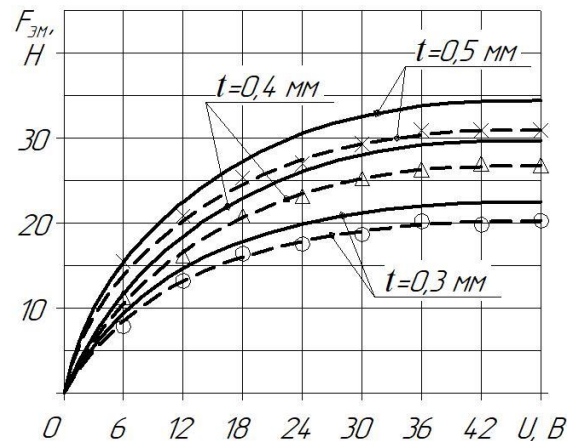


Рисунок 6. Зависимости силы притяжения электромагнита от напряжения U на обмотке и толщины кольца: расчетные (сплошные линии) и экспериментальные после аппроксимации (пунктирные линии с точками)

Picture 6. Dependence of the attractive force of the electromagnet on the voltage U on the winding and the ring thickness: calculated (solid lines) and experimental after approximation (dashed lines with points)

С увеличением напряжения U и толщины кольца сила притяжения возрастала, что связано с увеличением электромагнитной индукции и площади сечения кольца. Падение влияния увеличивающегося напряжения на полученную силу электромагнита – это следствие насыщения магнитным потоком кольца.

Экспериментальные значения оказались меньше расчетных на 8-9%. Это связано с влиянием жесткости кольца на силу притяжения, что не учитывалось в программном расчете.

В целом расчетные и экспериментальные зависимости показали хорошую сходимость при указанных допущениях. Оптимальными размерами разрезного кольца с учетом конструктивных соображений, а также расчетных и экспериментальных данных являются $D = 20$ мм, $b = 10$ мм, $t = 0,4$ мм. Такие параметры будут обеспечивать заданное значение перемещения $\pi \cdot h$ скользящей кромки разрезного кольца, необходимое для перекрытия сливного

канала, а также надежные условия работы электромагнита с превышением его силы притяжения над противодействующими силами.

Усовершенствование насос-форсунки путем использования в управляющем клапане разрезного упругого кольца с электромагнитным приводом позволило получить технический эффект механического мультипликатора (управляющая кромка в π раз раньше перекрывает канал слива, тем самым снижая время срабатывания клапана). Разрезное кольцо функционирует и как пружина, одновременно упрощая тем самым конструкцию насос-форсунки.

Выводы. Применение упругого разрезного кольца в управляющем клапане позволяет существенно упростить функционирование насос-форсунки типа HEUI. Это связано с получением нового технического эффекта – механического мультипликатора – благодаря перемещению скользящей кромки разрезного кольца на величину $\pi \cdot h$ в зоне уплотнения канала подвода рабочей жидкости.

Предложены математические выражения для определения жесткости разрезного кольца k и его хода h , позволившие выявить оптимальные размеры кольцевого управляющего клапана – диаметр, ширину и толщину кольца. Оптимальные размеры подтверждены теоретическими и экспериментальными исследованиями.

Определены параметры обмотки электромагнита кольцевого управляющего клапана с целью получения максимальной мощности для преодоления противодействующих сил. Получены расчетные и экспериментальные зависимости работы электромагнита для обеспечения надежности его работы.

Усовершенствована конструкция насос-форсунки HEUI с использованием кольцевого управляющего клапана, позволяющая повысить быстродействие управления топливоподачей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Габдрафиков, Ф.З. Модернизация системы топливоподачи дизеля непосредственного действия повышением интенсивности впрыскивания / Ф.З. Габдрафиков, И. В. Муслимов // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2022. – Т. 17. № 3 (67). – С. 68–72.
2. Gabdrafikov F.Z. Modernization of the fuel supply system in the internal combustion engine by electronic control of the ring valve / F.Z. Gabdrafikov, D.D. Kharisov, I.G. Galiev, R.K. Khusainov // BIO Web of Conferences. International Scientific–Practical Conference “Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources”. Kazan. – 2022. – Vol. 52. – P. 00028.
3. Qiu, T. et al. Optimizing the cam profile of an electronic unit pump for a heavy-duty diesel engine. // Energy, Elsevier. – 2013. – Vol. 83(C). – Pp. 276–283.
4. Dexing, Q. Fluid-Structure Interaction Analysis on the Performance of the High-Pressure Fuel Pump for Diesel Engines / Q. Dexing, L. Ridong, X. Jianhua, S. Baigang, W. Shangyong // ASME – 2016. International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Phoenix, Arizona, USA. – 2016. – Vol. 4A. – 9 p. (<https://doi.org/10.1115/IMECE2016-66766>).
5. Salykin, E.A. Method of Fuel Injection in Small Diesel Engines / E.A. Salykin, V.I. Lipilin, A.A. Skorobogatov // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 206. – Pp. 1552–1557.
6. Miloljub, S. Mathematical modeling and identification of the mathematical model parameters of diesel fuel injection systems / S. Miloljub // Vojnotehnički glasnik – Military technical courier. – 2017. – Vol. 65, Issue 2. – Pp. 421–441.

7. Zhao, J. Operation-related features of diesel fuel injection systems at pressures up to 400 MPa / J. Zhao, L. Grekhov, A. Denisov, D. Onishchenko // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. "6th International Conference on Energy Engineering and Environmental Protection". – 2022. – Vol. 983. – P. 012058.
8. Xuan-Thien, T. Modelling HEUI injector In MATLAB Simulink. / T. Xuan-Thien, B. Milton, T. White, M. Tordon // Proceedings–2003. IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. – 2003. – Vol. 2. – Pp. 383–388. (<https://doi.org/10.1109/AIM.2003.1225126>)
9. Coldren, D. Hydraulic Electronic Unit Injector with Rate Shaping Capability / D. Coldren, S. Schuricht, R. Smith // SAE Technical Paper 2003–01–1384. – 2003. – 16 p. <https://doi.org/10.4271/2003–01–1384>.
10. Zhu, X. HEUI Injector Modeling and ROI Experiments for High Injection Pressure of Diesel and Dimethyl Ether (DME). / X. Zhu, S. Limbu, K. Cung, W. De Ojeda et al. // SAE Technical Paper 2016–01–0855. – 2016. – 11 p., <https://doi.org/10.4271/2016–01–0855>.
11. Puente, E. Analisis Y Diagnostico Del Sistema De Control Electronico De Inyeccion De Combustible Diesel HEUI CAT–3126 / E. Puente // INNOVA Research Journal. – 2018. – Vol. 3. – Pp. 145–150.

REFERENCES

1. Gabdrafiqov, F.Z. and Muslimov, I.V. (2022) ‘Modernization of the direct–action diesel fuel supply system by increasing injection intensity’, *Bulletin of the Kazan State Agrarian University*, vol. 17, no. 3 (67), pp. 68–72.
2. Gabdrafiqov, F.Z., Kharisov, D.D., Galiev, I.G. and Khusainov, R.K. (2022) ‘Modernization of the fuel supply system in the internal combustion engine by electronic control of the ring valve’, BIO Web of Conferences. International Scientific-Practical Conference “Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources”, Kazan, vol. 52, p. 00028.
3. Qiu, T., Dai, H., Lei, Y., Cao, C. and Li, X. (2013) ‘Optimizing the cam profile of an electronic unit pump for a heavy–duty diesel engine’, *Energy, Elsevier*, vol. 83(C), pp. 276–283.
4. Dexing, Q., Ridong, L., Jianhua, X., Baigang, S. and Shangyong, W. (2016), “Fluid–Structure Interaction Analysis on the Performance of the High–Pressure Fuel Pump for Diesel Engines” ASME – 2016. International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Phoenix, Arizona, USA, vol. 4A, 9 p.
5. Salykin, E.A., Lipilin, V.I., and Skorobogatov, A.A. (2017) ‘Method of Fuel Injection in Small Diesel Engines’, *Procedia Engineering*, vol. 206, pp. 1552–1557.
6. Miloljub, S. (2017) ‘Mathematical modeling and identification of the mathematical model parameters of diesel fuel injection systems’, *Vojnotehnički glasnik – Military technical courier*, vol. 65, pp. 421–441.
7. Zhao, J., Grekhov, L., Denisov, A., and Onishchenko, D. (2022) ‘Operation–related features of diesel fuel injection systems at pressures up to 400 MPa’, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, "6th International Conference on Energy Engineering and Environmental Protection", vol. 983, p. 012058.
8. Xuan-Thien, T., Milton, B., White, T. and Tordon, M. (2003) ‘Modelling HEUI injector In MATLAB Simulink’, IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, vol. 2, pp. 383–388.
9. Coldren, D., Schuricht, S. and Smith, R. (2003) ‘Hydraulic Electronic Unit Injector with Rate Shaping Capability’, SAE Technical Paper 2003-01-1384, 16 p.

10. Zhu, X., Limbu, S., Cung, K., De Ojeda, W. and al. (2016) 'HEUI Injector Modeling and ROI Experiments for High Injection Pressure of Diesel and Dimethyl Ether (DME)', SAE Technical Paper 2016-01-0855, 11 p.
11. Puente, E. (2018) 'Análisis Y Diagnostico Del Sistema De Control Electronico De Inyeccion De Combustible Diesel HEUI CAT-3126', INNOVA Research Journal, vol. 3, pp. 145–150.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Фаниль Закариевич Габдрафиков, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры теплоэнергетики и физики, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный аграрный университет», Уфа, Россия; <http://orcid.org/0000-0002-9460-5697>; SPIN-код: 3300-8572, Scopus author ID: 6507532052, Researcher ID: G-1565-20; e-mail: gabdrafikov@mail.ru.

Денис Дамирович Харисов, кандидат технических наук, доцент кафедры теплоэнергетики и физики, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный аграрный университет», Уфа, Россия; <http://orcid.org/0009-0009-5648-5135>, SPIN-код: 3596-5273, Scopus author ID: 57204632114, Researcher ID: F-4085-2018; e-mail: kharisov777@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Fanil Z. Gabdrafikov, Doc. Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Thermal Power Engineering and Physics, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Bashkir State Agrarian University", Ufa, Russia; <http://orcid.org/0000-0002-9460-5697>, SPIN-code: 3300-8572, Scopus author ID: 6507532052, Researcher ID: G-1565-20; e-mail: gabdrafikov@mail.ru.

Denis D. Kharisov, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Department of Thermal Power Engineering and Physics, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Bashkir State Agrarian University", Ufa, Russia; <http://orcid.org/0009-0009-5648-5135>; SPIN-code: 3596-5273, Scopus author ID: 57204632114, Researcher ID: F-4085-2018; e-mail: kharisov777@mail.ru.

Авторский вклад. Все авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении и анализе данного исследования. Все авторы настоящей статьи ознакомились и одобрили представленный окончательный вариант.

Author's contribution. All authors of this research paper have directly participated in the planning, execution, or analysis of this study. All authors of this paper have read and approved the final version submitted.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Received 19.05.2024
Поступила после рецензирования / Revised 11.08.2024
Принята к публикации / Accepted 20.08.2024

Научная статья/Original article


УДК 621.314.1

Код ВАК: 4.3.2

DOI: 10.24411/2078-1318-2024-3-128-136

СРАВНЕНИЕ СХЕМОТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ БЛОКОВ ПИТАНИЯ
ДЛЯ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСАА.Д. Гришин¹  , М.М. Беззубцева¹ ¹Санкт-Петербургский государственный аграрный университет

г. Пушкин, г. Санкт-Петербург, Россия

 grischin.aleks201086@mail.ru

Реферат. Системы стабилизации и буферизации входного питания контроллеров, системы диспетчеризации, автоматизации и резервирования АПК набирают все большую популярность в России. Это связано с критически большим отклонением реальных значений выдаваемого напряжения в сетях на вводе в предприятие АПК. В последнее время наибольший интерес вызывают устройства прецизионной стабилизации выдаваемого напряжения с минимальными пульсациями и шумовыми помехами, что достигается путем создания резервной системы последовательного питания, состоящей из преобразователей класса AC/DC и DC/DC. Цель настоящего исследования – разработка эффективного схемотехнического решения для проектирования DC/DC преобразователя со стабильными выходными параметрами и встроенными фильтрами помехоподавления и электромагнитной совместимости. Был проведен эксперимент, в котором сравнивались стандартные и разработанное принципиально новое схемотехнические решения по топологии DC/DC преобразователя с встроенным помехоподавляющим фильтром и фильтром электромагнитной совместимости. Экспериментальным путем установлено, что на производительность источника питания прямое влияние оказывают токозадающая цепь и расчетные параметры тактовой частоты ШИМ-контроллера, рабочий диапазон скважности и пульсаций, так как именно эти параметры определяют значения выходных характеристик, именно по ним происходит настройка внутреннего стабилизатора. Дополнительно рассмотрена возможность применения в источниках питания высокочастотного трансформатора и применение защищенной цепи силового транзистора со сглаживающими фильтрующими конденсаторами, произведен расчет конструктивных и электротехнических параметров топологии разрабатываемого преобразователя. Таким образом, прецизионный источник питания класса DC/DC преобразователь с встроенным помехоподавляющим фильтром и фильтром электромагнитной совместимости является высокоэффективным устройством с возможностью эксплуатации в АПК.

Ключевые слова: источник питания, преобразователь напряжения, помехоподавляющий фильтр, DC/DC преобразователь, фильтр электромагнитной совместимости


Для цитирования: Гришин, А.Д., Беззубцева, М.М. Сравнение схемотехнических решений блоков питания для агропромышленного комплекса // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2024. – 3 (77). – С. 128–136. – DOI: 10.24411/2078-1318-2024-3-128-136.

COMPARISON OF CIRCUIT DESIGN SOLUTIONS OF POWER SUPPLIES FOR THE AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX

A.D. Grishin¹  , M.M. Bezzubtseva¹ 

¹Saint-Petersburg State Agrarian University

Pushkin, Saint Petersburg, Russia

 grischin.aleks201086@mail.ru

Abstract. Stabilization and buffering systems for the input power supply of controllers, dispatching automation and redundancy systems of the agro-industrial complex are gaining popularity in Russia. This is due to the critically large deviation of real values of the output voltage in the networks at the input to the AIC enterprise. Recently, the devices of precision stabilisation of the output voltage with minimum ripple and noise interference have attracted the greatest interest, which is achieved by creating a redundant serial power supply system consisting of AC/DC and DC/DC class converters. The purpose of this study is to develop an effective circuit design solution for the design of a DC/DC converter with stable output parameters and built-in noise reduction and electromagnetic compatibility filters. An experiment was carried out to compare the standard and developed fundamentally new circuit solutions for the topology of a DC/DC converter with an integrated noise suppressor and EMC filter. It has been experimentally established that the performance of the power supply is directly influenced by the current-carrying circuit and the calculated parameters of the clock frequency of the PWM controller, the operating range of slope and ripple, as it is these parameters determine the values of the output characteristics, it is on them that the internal stabiliser is adjusted. In addition, the possibility of using a high-frequency transformer in power supplies and the use of a protected power transistor circuit with smoothing filtering capacitors is considered, and the design and electrical parameters of the topology of the developed converter are calculated. Thus, a precision power supply of the DC/DC converter class with a built-in noise-suppressing filter and an electromagnetic compatibility filter is a highly efficient device with the possibility of operation in the agro-industrial complex.

Keywords: power supply, voltage converter, noise-canceling filter, DC/DC converter, electromagnetic compatibility filter

For citation: Grishin, A.D., Bezzubtseva, M.M. (2024) ‘Comparison of circuit design solutions of power supplies for the agro-industrial complex’, *Izvestiya of Saint-Petersburg State Agrarian University*, 2024, pp. 128–136. (In Russ.) DOI: 10.24411/2078-1318-2024-3-128-136.

Введение. Стабилизация рабочих процессов в АПК, а именно длительная бесперебойная работа автоматики, пунктов диспетчеризации и хранения информации, является актуальной на протяжении последних 20 лет. Особенно большую потребность предприятия АПК испытывают в автоматизированном контроле и работе по управлению датчиками и устройствами сравнения, которые сильно подвержены отклонениям напряжения, даже незначительным, в пределах 0,25 В. Обеспечение данных требований – одна из наиболее сложных при проектировании и расчете комплексов АПК задач; оно является неотъемлемым при проведении пуско-наладочных работ. Для выполнения данных задач рекомендовано использовать не просто общепринятую цепь, где на входе имеется AC/DC преобразователь, но с дополнительном резервированием за счет трехканального DC/DC преобразователя. Общепринятые топологические решения не всегда позволяют применять имеющиеся устройства в АПК, а отсутствие встроенных фильтров помех и электромагнитной

совместимости делает данную работу еще сложнее. Было решено разработать источник питания класса DC/DC преобразователь с встроенным помехоподавляющим фильтром и фильтром электромагнитной совместимости, а также предусмотреть в конструктиве устройства его применение в среде АПК [1]. В настоящее время на предприятиях АПК применяются AC/DC и DC/DC преобразователи фирмы Mean Well, устанавливают их в основном из-за дешевизны, но, к сожалению, часто экономия на блоке питания приводит к выходу из строя дорогого и прецизионного оборудования, так как преобразователи питания данной фирмы не отличаются качеством и не обладают встроенными цепями защиты. Разработанный на базе Санкт-Петербургского государственного аграрного университета блок питания обладает встроенными цепями защиты и имеет настраиваемый диапазон рабочих параметров.

Цель исследования – расчет и разработка схемотехнического решения DC/DC преобразователя с встроенным помехоподавляющим фильтром и фильтром электромагнитной совместимости; проектирование и оптимизация параметров токозадающей цепи; повышение энергоэффективности преобразователя, что позволяет применять устройство в высокопрецизионных установках АПК; заливка готового изделия компаундов открывает возможность его применения в агрессивной среде эксплуатации, например, в умных теплицах.

Материалы, методы и объекты исследования. Объектами исследования являются параметры диапазона выходного напряжения преобразователя, значения тактовой частоты, скважности и пульсации в пиковые моменты работы устройства. При разработке схемотехнических решений проводился расчет токозадающей цепи устройства (выбор компонентов, разработка трассировки цепи на печатной плате), по которому определялись параметры тактовой частоты преобразователя и прецизионность выходного напряжения (плавающий диапазон отклонений). Оптимальное значение достигается тогда, когда выходное напряжение отклоняется при различных режимах работы не более чем на 0,2 В (0,05%) от номинала (24,0 В), что достигается за счет применения в токозадающей цепи стабилизатора напряжения. При разработке топологии печатной платы необходимо учитывать параметры пульсаций и скважности устройства, они должны быть в допустимом диапазоне, но пачки импульсов работы микросхемы не должны наслаиваться при работе. Лабораторные испытания необходимо проводить в нормальных температурных условиях (температура окружающей среды 25 °С), а настройку устройства – при минимальных (-20 °С) и максимальных (+50 °С) рабочих температурах окружающей среды [2, 3].

Методика разработки эффективного схемотехнического решения блока питания

Основными параметрами при разработке блока питания являются расчет и выбор компонентов токозадающей цепи, цепи силового трансформатора, расчет конденсаторов и дросселей встроенных фильтров.

В настоящее время на отечественном рынке наблюдается острая нехватка специализированных компонентов с широкими рабочими диапазонами, именно этот фактор оказывает ключевое влияние на выбор схемотехнического решения и трассировку печатных плат блока питания.

Выбор компонентов для токозадающей цепи производится по следующим критериям: значения рассеиваемой мощности на резисторах (W_p), минимальные и максимальные значения пускового напряжения на ШИМ-контроллере (U_{min} , U_{max}), ток потребления ШИМ-

контроллера (I_p), диапазон температуры окружающей среды (T_{out}), температура автоматизированной пайки (T_i) (стоит учитывать при конвейерном монтаже печатных плат).

Исходя из вышепредставленных факторов, производят выбор класса применяемых компонентов в DC/DC преобразователе. В разрабатываемом устройстве выбор был сделан в пользу следующих компонентов: резисторы (корпусное исполнение – 1206, класс точности $\pm 1\%$), конденсаторы (X7R в корпусном исполнении 0805 и NP0 в корпусном исполнении 1206), двунаправленные защитные диоды (TVS марки SM6T7V5CA производства STM).

Данные типы выбранных компонентов широко применяются в схемотехнических решениях преобразователей в связи с высокой надежностью и низкой ценой [4].

Токозадающая цепь работает следующим образом: на три последовательно соединенных резистора, подключенных с одной стороны на вывод 3 ШИМ-контроллера и с другой стороны к Снабберной цепи, подается управляющий сигнал с силового транзистора, что позволяет через встроенный внутри ШИМ-контроллера компаратор сравнения анализировать входной сигнал с выходным сигналом Снабберной цепи, а в случае расхождения производится автостабилизация, тем самым стабилизируя выходное напряжение на разработанном блоке питания; также с вывода 6 ШИМ-контроллера выходит сигнал на керамические конденсаторы, которые сглаживают его перед входом во встроенный стабилизатор напряжения, работающий в диапазоне от 2,5 В до 5,5 В, выходное напряжение которого равно 15,0 В, которое подается на вывод 7 ШИМ-контроллера, тем самым обеспечивая его работоспособность в диапазоне параметров скважности от 48% до 52%. Принципиальная электрическая схема ШИМ-контроллера указана на рисунке 1.

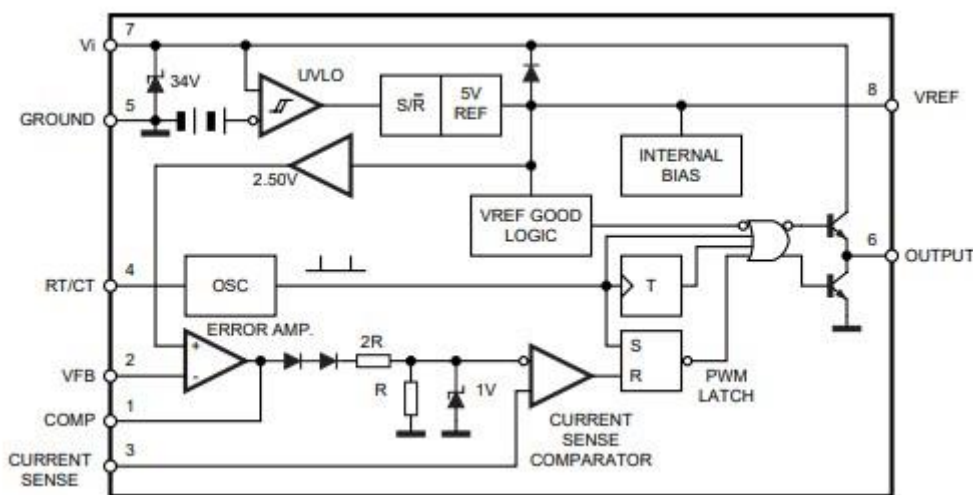


Рисунок 1. Принципиальная электрическая схема ШИМ-контроллера
 Picture 1. PWM controller schematic diagram

Следующей цепью устройства, повышающей его энергоэффективность, служит встроенный помехоподавляющий фильтр (фильтр выходных помех) цепи обвязки микроконтроллера (выходная токозадающая цепь). Он должен быть рассчитан на максимальные значения кратковременных и долгосрочных нагрузок, а также их изменений в кратковременных циклах, что позволяет в конечном счете сгладить выходные пульсации и качественно стабилизировать выходное напряжение на устройстве [5, 6].

Заключающим параметром, оказывающим влияние на производительность и эффективность блока питания, является трансформатор, так как именно данный компонент является ключевым при проектировании устройства и задает его основные масса-габаритные параметры [7].

Встроенный помехоподавляющий фильтр в блоке питания

Вторым ключевым моментом при проектировании схемотехнического решения является расчет встроенных фильтров подавления помех и электромагнитной совместимости. Для реализации данной задачи необходимо использовать связующую цепь между ШИМ-контроллером и выходной сглаживающей цепью. Сам фильтр состоит из полярных алюминиевых конденсаторов емкостью 330 мкФ (50 В) с точностью $\pm 1\%$, керамических конденсаторов емкостью 0,1 мкФ (50 В) с точностью $\pm 10\%$ и параллельно соединенных индуктивностей (номинальное значение 25 мГн $\pm 5\%$).

При подготовке производственных файлов для изготовления подложек печатных плат необходимо учитывать параметры покрытия паяльных площадок (покрытие HASL): высота проводников должна быть 35 мкм, а ширина не менее 0,85 мм [8, 9, 10].

Результаты исследования. Проведен эксперимент на физической модели разработанного преобразователя, в котором были исследованы следующие параметры: значение выходного напряжения, скажность, пульсации, выходные шумы и выход на II кривую электромагнитной совместимости. Эксперимент был выполнен при трех различных схемотехнических решениях.

Перед заказом и изготовлением подложек печатных плат и проведением лабораторных испытаний были рассчитаны и смоделированы основные параметрические показатели устройства в соответствии с методиками производителей компонентов; произведен расчет минимальных требований к топологии печатной платы (при разработке данные требования были увеличены в два раза для повышения уровня надежности).

При проектировании устройства стоит отметить такую характеристику, как зависимость КПД от нагрузки и снижения мощности: для разрабатываемого устройства график приведен на рисунке 2.

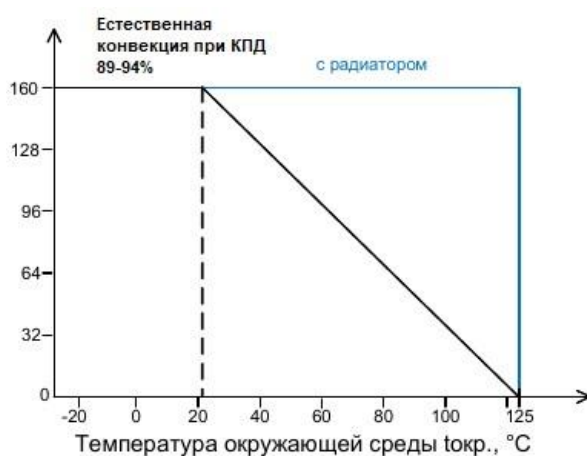


Рисунок 2. График зависимости КПД от нагрузки и снижения мощности блока питания
Picture 2. Graph of efficiency dependence on load and power reduction of the power supply unit

Основные требования к характеристикам разрабатываемого блока питания: входное напряжение питания от AC/DC преобразователя 5,00–80,00 В, выходное напряжение 24,00±0,20В, скважность должна быть в диапазоне 48–52%, диапазон пульсаций 170,00–225,00 мВ, тактовая частота 100,0–125,0 кГц. Исходя из данных критериев складывались требования, предъявляемые к разработанному устройству (см. таблицу).

Таблица. Сравнение параметров разработанного блока питания
Table. Comparison of the parameters of the developed power supply unit

Номер опыта	Показатели	Выходное напряжение, В	Скважность, %	Пульсации, мВ	Входное напряжение, В	Тактовая частота, кГц
1	Лабораторные значения	24,20	51,90	172	5,00	1118
	Допустимые значения	24,00 – 24,20	51,50-52,00	170-180		115-120
2	Лабораторные значения	24,20	51,50	181	15,00	116
	Допустимые значения	24,00 – 24,20	51,25–51,75	175-185		115-120
3	Лабораторные значения	24,15	51,24	187	20,00	110
	Допустимые значения	24,00 – 24,20	51,00-51,25	185-195		105-115
4	Лабораторные значения	24,12	51,02	194	24,00	110
	Допустимые значения	24,00 – 24,20	50,80-51,20	190-200		110-115
5	Лабораторные значения	24,10	50,91	201	35,00	105
	Допустимые значения	24,00 – 24,20	50,50-51,00	200-205		100-110
6	Лабораторные значения	24,05	80,71	214	50,00	104
	Допустимые значения	24,00 – 24,20	50,25-50,75	210-215		100-105
7	Лабораторные значения	24,05	50,49	221	80,00	101
	Допустимые значения	24,00 – 24,20	50,00-50,75	220-225		100-105

Из этого следует, что для применения блока питания в сфере АПК, а именно удовлетворение всем требованиям, в т. ч. требованию резервирования питания во вторичных цепях с возможностью эксплуатации в агрессивной среде, необходимо выполнить следующие требования:

- применение прецизионной токозадающей цепи на входе ШИМ-контроллера;
- расчет всех параметров должен производиться для максимальных пиковых значений с дополнительным запасом по увеличению в 50%;

- применение согласующихся между собой компонентов, работающих в едином диапазоне тактовой частоты;

- значения пульсаций ШИМ-контроллера возрастают при увеличении входного напряжения, тогда как значения скважности уменьшаются, это связано с подстройкой токозадающей цепи: значения тактовой частоты уменьшаются при увеличении входного напряжения за счет того, что стабилизатор уменьшает выходное напряжение на 0,05 В, поступающее на вход ШИМ-контроллера, чтобы снизить нагрузку на нем.

Выводы. Можно сделать вывод о том, что схемотехнические решения при разработке преобразователя напряжения класса DC/DC должны учитывать следующие факторы: диапазон входного и выходного напряжения, изменения температуры окружающей среды, средние и пиковые показатели нагрузки. Повышение КПД устройства с 89% до 94% возможно за счет полноценного и расширенного расчета применяемых компонентов токозадающей цепи и их последующего применения в схеме, а также наличия встроенных фильтров помехоподавления и электромагнитной совместимости в устройстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гулин, С.В. Особенности бизнес-реинжиниринга при создании и эксплуатации электротехнологического оборудования / С. В. Гулин, А. Г. Пиркин // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2020. – № 58. – С. 130–136. – DOI: 10.24411/2078-1318-2020-11130. – EDN TGXWBQ.
2. Гулин, С.В. Комплексный подход к оценке эффективности сложного электротехнологического оборудования на предприятиях АПК / С. В. Гулин, А. Г. Пиркин // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2022. – № 2 (67). – С. 145–154. – DOI: 10.24412/2078-1318-2022-2-145-154. – EDN VHROMO.
3. Ракутько, С.А. Влияние отклонения напряжения питания на характеристики люминесцентных ламп / С. А. Ракутько, Г. В. Медведев, Е. Н. Ракутько // АгроЭкоИнженерия. – 2024. – № 1(118). – С. 149–160. – DOI: 10.24412/2713-2641-2024-1118-149-160. – EDN OZPROB.
4. Волков, В.С. Интенсификация аппаратурно-технологической системы производства корма для аквакультуры в аппаратах с магнитооживленным слоем ферротел / В. С. Волков, Г. В. Медведев // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2023. – № 2(71). – С. 144–153. – DOI: 10.24412/2078-1318-2023-2-144-153. – EDN XFZMТК.
5. Семенов, А.Ю. Разработка и исследование режимов работы универсального блока питания / А. Ю. Семенов, А. С. Гладки // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: мат. VI Национальной (всероссийской) научно-технической конференции, Петропавловск-Камчатский, 09–10 ноября 2023 года. – Петропавловск-Камчатский: Камчатский государственный технический университет, 2024. – С. 78–81. – EDN YRMOFC.
6. Игошин, Д.А. Разнообразие видов современных блоков питания / Д. А. Игошин // Цифровое общество: научные инициативы и новые вызовы: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции, Москва, 22 декабря 2023 года. – Москва: Центр развития образования и науки, АЛЕФ, 2023. – С. 204–208. – EDN ECLBCJ.
7. Елизарьева, М.Г. Переделка компьютерного блока питания в лабораторный регулируемый блок питания / М. Г. Елизарьева, В. Ф. Бадыгов // Актуальные проблемы авиации и космонавтики: сб. мат. IX Междунар. науч.-практ. конф. В 3 т. Красноярск, 10–14 апреля 2023 года. – Красноярск: СибГУ им. М.Ф. Решетнева, 2023. – С. 680–682. – EDN HLEKKN.
8. Морозов, Н.В. Повышение качества электроэнергии в сельской местности / Н. В. Морозов, Д. Л. Насонов, Л. Г. Мамонова // Электроэнергетика сегодня и завтра: сборник научных статей III Международной научно-технической конференции, Курск, 27 марта 2024 года. – Курск: Университетская книга, 2024. – С. 191–194. – EDN SMOLYA.
9. Беззубцева, М.М. Разработка топологии импульсного AC/DC преобразователя / М. М. Беззубцева, А. Д. Гришин // Научное обеспечение развития АПК в условиях

импортозамещения: сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург – Пушкин, 25–27 мая 2022 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, 2022. – С. 247–250. – EDN HQDITD.

10. Гришин, А.Д. Применение преобразователей напряжения в сельском хозяйстве / А. Д. Гришин, М. М. Беззубцева // Интеллектуальный потенциал молодых ученых как драйвер развития АПК: Материалы международной научно-практической конференции молодых ученых и обучающихся, Санкт-Петербург – Пушкин, 16–18 марта 2022 года. Часть II. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, 2022. – С. 52–55. – EDN IDEGHW.

REFERENCES

1. Gulin, S.V and Pirkin, A.G. (2020) ‘Features of business reengineering in the creation and operation of electrotechnological equipment’, *Izvestiya of Saint-Petersburg State Agrarian University*, no. 58, pp. 130–136.
2. Gulin, S.V and Pirkin, A.G. (2022) ‘An integrated approach to evaluating the effectiveness of complex electrotechnological equipment at agricultural enterprises’, *Izvestiya of Saint-Petersburg State Agrarian University*, no. 2(67), pp. 145–154.
3. Rakutko, S.A., Medvedev, G.V. and Rakutko, E.N. (2024) ‘The influence of supply voltage deviation on the characteristics of fluorescent lamps’, *Agroecoengineering*, vol. 118, no. 1, pp. 149–160.
4. Volkov, V.S. and Medvedev, G.V. (2023) ‘Intensification of the hardware and technological system for the production of feed for aquaculture in devices with a magnetically liquefied ferrotel layer’, *Izvestiya Saint-Petersburg State Agrarian University*, no. 2(71), pp. 144–153.
5. Semenenko, A.Yu. and Gladki, A.S. (2023) ‘Development and research of the modes of operation of the universal power supply’, *Technical operation of water transport: problems and ways of development: Materials of the Sixth National (All-Russian) scientific and technical conference, Petropavlovsk-Kamchatsky, 9–10 November 2023*, Petropavlovsk-Kamchatsky, pp. 78–81.
6. Igoshin, D.A. (2023) ‘Diversity of types of modern power supplies’, *Digital Society: scientific initiatives and new challenges: A collection of scientific papers based on the materials of the International Scientific and Practical Conference, Moscow, 22 December 2023*, Moscow, pp. 204–208.
7. Elizarieva, M.G. and Badygov, V.F. (2023) ‘Conversion of a computer power supply unit into a laboratory adjustable power supply unit’, *Actual problems of aviation and cosmonautics: A collection of materials from the IX International Scientific and Practical Conference dedicated to Cosmonautics Day. In 3 volumes. Krasnoyarsk, 10–14 April 2023*, Krasnoyarsk, pp. 680–682.
8. Morozov, N.V., Nasonov, D.L. and Mamonova, L.G. (2024) ‘Improving the quality of electricity in rural areas’, *Electric power industry today and tomorrow: collection of scientific articles of the 3rd International Scientific and Technical Conference, Kursk, 27 March 2024*, pp. 191–194.
9. Bezzubtseva, M.M. and Grishin, A.D. (2022) ‘Development of the topology of a pulsed AC/DC converter’, *Scientific support for the development of agriculture in the conditions of import substitution: a collection of scientific papers based on the materials of the international scientific and practical conference, St. Petersburg – Pushkin, 25–27 May 2022*, pp. 247–250.
10. Grishin, A.D., Bezzubtseva, M.M. (2022) ‘Application of voltage converters in agriculture’, *Intellectual potential of young scientists as a driver of agricultural development: Materials of the International scientific and practical conference of young scientists and students, St. Petersburg – Pushkin, 16–18 March 2022*, pp. 52–55.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Алексей Дмитриевич Гришин, аспирант кафедры «Энергообеспечение предприятий и электротехнологий», федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет», Пушкин, Санкт-Петербург, Россия; <https://orcid.org/0000-0003-1429-1358>, SPIN-код: 3703-6045, AuthorID: 1096393; e-mail: grischin.aleks201086@mail.ru.

Марина Михайловна Беззубцева, доктор технических наук, профессор кафедры «Энергообеспечение предприятий и электротехнологий», федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет», Пушкин, Санкт-Петербург, Россия; <https://orcid.org/0000-0001-8469-7981>, SPIN-код: 7467-3451, AuthorID: 271361; e-mail: mysnegana@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexey D. Grishin, Postgraduate Student of the Department of Energy Supply of Enterprises and Electrical Technologies, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Saint-Petersburg State Agrarian University"; <https://orcid.org/0000-0003-1429-1358>, SPIN-code: 3703-6045, AuthorID: 1096393; e-mail: grischin.aleks201086@mail.ru.

Marina M. Bezzubtseva, Doc. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Energy Supply of Enterprises and Electrical Technologies, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Saint-Petersburg State Agrarian University"; <https://orcid.org/0000-0001-8469-7981>, SPIN-code: 7467-3451, AuthorID: 271361; e-mail: mysnegana@mail.ru.

Авторский вклад. Все авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении и анализе данного исследования. Все авторы настоящей статьи ознакомились и одобрили представленный окончательный вариант.

Author's contribution. All authors of this research paper have directly participated in the planning, execution, or analysis of this study. All authors of this paper have read and approved the final version submitted.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Received 05.07.2024
Поступила после рецензирования / Revised 21.08.2024
Принята к публикации / Accepted 04.09.2024

Научная статья/Original article

УДК 621.31

Код ВАК: 4.3.2


DOI: 10.24411/2078-1318-2024-3-137-145

ОЦЕНКА РЕСУРСА СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ ТЕРРИТОРИИ ОБЪЕКТА АПК

Ю.В. Даус¹  , И.В. Юдаев¹ 

¹Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина

г. Краснодар, Россия

 zirochka2505@gmail.com


Реферат. Уточнение потенциала солнечной энергии с учетом ландшафтных и строительных особенностей выделенных или свободных территорий для размещения фотоэлектрических батарей имеет решающее значение для определения того, где инвестиции в солнечную фотоэлектрическую энергетику будут наиболее выгодны потребителю. При этом следует учитывать целый ряд факторов: пространственную ориентацию ограждающих конструкций зданий, их режим инсоляции и т. д. Чаще всего физическая оценка включает обработку спутниковых изображений с использованием инструментов ГИС для создания и анализа карт солнечного облучения, что не подходит для малых территорий. Таким образом, актуальным является уточнение ресурса солнечной энергии для территории сельскохозяйственного предприятия. Цель исследования – проанализировать ресурс солнечной энергии территории сельскохозяйственного предприятия с учетом её строительных и ландшафтных особенностей. Объект исследования – действующее перерабатывающее сельскохозяйственное предприятие Ростовской области. Использован программный комплекс оценки ресурса солнечной энергии в заданной географической точке. Валовый потенциал солнечной энергии для южных регионов Российской Федерации составляет примерно 1250 кВт·ч/м²·год; если оптимально ориентировать приемную поверхность модулей фотоэлектрической батареи в пространстве, то поток солнечного излучения за год на его поверхности может достигнуть 1400 кВт·ч/м²·год. Но в условиях ландшафтных и строительных особенностей территории объекта АПК эта величина может существенно снижаться – как относительно площади территории потребителя, так и относительно площади занимаемых фотоэлектрической батареей участков: до 1–2% и 40–45% соответственно. При этом учет всех ограничений на размещение фотоэлектрических батарей позволяет обеспечить на поверхности каждого устанавливаемого модуля поток солнечного излучения, близкий к максимально возможному значению (94–97%).

Ключевые слова: ресурс солнечной энергии, валовый потенциал, условия освещенности, пространственная ориентация

Для цитирования: Даус, Ю.В., Юдаев, И.В. Оценка ресурса солнечной энергии территории объекта АПК // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2024. – № 3 (77). – С. 137–145. – DOI: 10.24411/2078-1318-2024-3-137-145.

SOLAR ENERGY RESOURCE ASSESSMENT OF THE AGRICULTURAL
INDUSTRIAL COMPLEX ENTERPRISE TERRITORYY.V. Daus¹  , I.V. Yudaev¹ ¹Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin

Krasnodar, Russia

 zirochka2505@gmail.com

Abstract. Clarifying the solar energy potential given the landscape and building characteristics of designated or vacant areas for PV deployment is critical to determining where solar PV investments will be most beneficial to the consumer. In this case, a number of factors must be taken into account: the spatial orientation of the building envelopes, their insolation conditions, etc. Most often, physical assessment involves processing satellite images using GIS tools to create and analyze solar irradiation maps, which is not suitable for small areas. Thus, it is relevant to clarify the solar energy resource for the territory of an agricultural enterprise. The purpose of the study is to analyze the solar energy resource of the territory of an agricultural enterprise, taking into account its construction and landscape features. The object of the study is an operating agricultural processing enterprise in the Rostov Region. A software package for assessing the solar energy resource at a given geographical point was used. The gross potential of solar energy for the southern regions of the Russian Federation is approximately 1250 kWh/m² year; if the receiving surface of photovoltaic battery modules is optimally oriented in space, then the flux of solar radiation per year on its surface can reach 1400 kWh/m² year. However, under the conditions of landscape and construction features of the territory of the agricultural complex, this value can decrease significantly both relative to the area of the consumer's territory and relative to the area of the areas occupied by the photovoltaic battery: up to 1–2% and 40–45%, respectively. At the same time, taking into account all restrictions on the placement of photovoltaic batteries makes it possible to ensure on the surface of each installed module a solar radiation flux close to its maximum possible value (94–97%).

Keywords: solar energy resource, gross potential, lighting conditions, spatial orientation

For citation: Daus, Yu.V. and Yudaev, I.V. (2024) 'Solar energy resource assessment of the agricultural industrial complex enterprise territory', *Izvestiya of Saint-Petersburg State Agrarian University*, vol. 77, no. 3 pp. 137–145. (In Russ.) DOI: 10.24411/2078-1318-2024-3-137-145.

Введение. Интенсивное развитие производства сельскохозяйственной продукции, как и других видов продукции, привело к постоянному росту потребления энергии и стало общепризнанной проблемой во всем мире [1].

Поиск и разработка локальных источников энергии для устойчивого развития регионов являются серьезной проблемой для многих стран. Фотоэлектрическая технология производства электрической энергии может стать основой для декарбонизации строительного сектора, снижения энергетической зависимости от ископаемого топлива и предоставления финансовых выгод потребителям. Уточнение потенциала солнечной энергии с учетом ландшафтных и строительных особенностей выделенных или свободных территорий для размещения фотоэлектрических батарей имеет решающее значение для определения того, где инвестиции в солнечную фотоэлектрическую энергетику будут наиболее выгодны потребителю [2].

В настоящее время выработка энергии с помощью фотоэлектрических модулей на крышах также интересна с точки зрения сокращения выбросов углекислого газа, что особенно актуально для устойчивого развития территорий сельскохозяйственного назначения [3].

Когда идет речь о создании здания с нулевым потреблением энергии (net-zero), в работах многих исследователей говорится о важности учета топографических, климатических, технологических, нормативных и экономических факторов [4]. К ним относятся различные государственные стандарты и положения, возможность организации технологии хранения энергии, согласование нагрузки, взаимодействие с сетью, а также расходы, доходы и диапазон инвестиционных вариантов.

Точная оценка солнечного потенциала крыш становится все более важной для точного прогнозирования потенциала локальной генерации и её внедрения как в существующие, так и в строящиеся системы энергоснабжения потребителей [5]. Однако точная оценка потенциала применения технологии фотоэлектрической выработки электрической энергии средствами крышных установок является сложной задачей из-за разнообразия конструкций крыш, необходимости учета режима их инсоляции [6].

Для оценки освещенности территории с помощью инструментов ГИС составляют карты солнечного облучения, однако такой подход не подходит для малых объектов. Многие исследователи изучали освещенность отдельных объектов с применением методов моделирования или экспериментальных данных [7], используя картографические материалы в масштабе микрорайонов и городов, реже – в региональном или национальном масштабе. Однако такие карты характеризуются низким пространственным разрешением, что делает их непригодными для получения качественных детальных сведений об условиях освещенности отдельных зданий.

Таким образом, актуальным является уточнение ресурса солнечной энергии для территории сельскохозяйственного предприятия с учетом её строительных и ландшафтных особенностей.

Цель исследования – проанализировать ресурс солнечной энергии территории сельскохозяйственного предприятия с учетом её строительных и ландшафтных особенностей.

Материалы, методы и объекты исследований. На рисунке 1 представлен план перерабатывающего сельскохозяйственного предприятия «Завод Сорго» ФГБНУ АНЦ Донской с указанием геометрических размеров и пространственной ориентации зданий, направления и угла наклона крыш относительно горизонта.

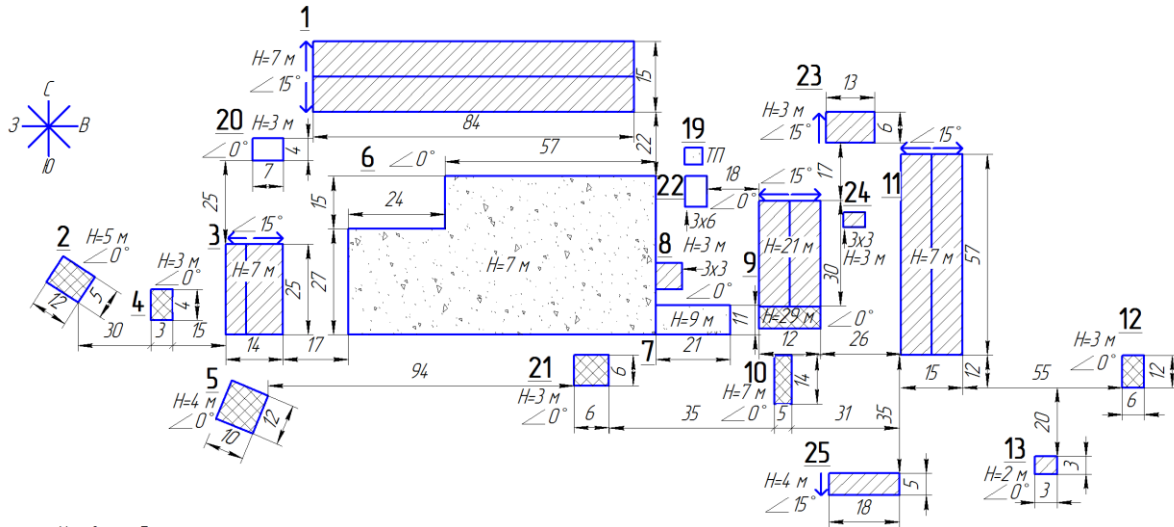


Рисунок 1. Генплан сельскохозяйственного предприятия «Завод Сорго»
Figure 1. General plan of the agricultural enterprise “Sorghum Plant”

Использован программный комплекс [8, 9] оценки ресурса солнечной энергии в заданной географической точке. В основе программного комплекса использован метод оценки ресурса солнечной энергии в заданной точке на поверхности Земли, который позволяет определить часовые суммы суммарной солнечной радиации (для дня n в момент времени t с учетом атмосферных условий), приходящей на приёмную площадку, ориентированную под углом β к горизонту с азимутом γ . Часовые суммы суммарной солнечной радиации определяются по формуле:

$$R = R_1^H \cdot \frac{\cos u}{\cos \beta} + R_2^H \cdot \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + (R_1^H + R_2^H) \cdot r_3 \cdot \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right),$$

где R_1^H, R_2^H – часовые суммы интенсивности прямой и рассеянной солнечной радиации для дня n в момент времени t на горизонтальной приемной поверхности, кВт·ч/м²;

r_3 – коэффициент отражения земной поверхности (альбедо),

u – угол падения прямого солнечного излучения на произвольно наклоненную под углом $\beta > 0$ приемную площадку с азимутом γ .

Затенение территории объекта моделировалось на основе этого же программного продукта с учетом размеров и взаимного размещения зданий потребителя [10].

Результаты и их обсуждение. Для рассматриваемой точки на поверхности Земли с географическими координатами 45,03° с. ш. и 38,98° в. д. анализ данных из доступных источников актинометрической информации по солнечной радиации, приходящей на горизонтальную к поверхности Земли приемную площадку, выявил значение валового потенциала 1246,87 кВт·ч/м²·год и значение ресурса солнечной энергии, который можно максимально утилизировать, при ориентации приёмной площадки под оптимальным углом в пространстве 1432,10 кВт·ч/м²·год [11, 12]. Проанализируем значения потока приходящего солнечного излучения для территории действующего сельскохозяйственного предприятия (рисунок 1) с учетом его ландшафтных и строительных особенностей. Площадь территории предприятия составляет $S = 55\,748 \text{ м}^2$, при этом под застройку отведено 13,8% – $S_{\text{ок}} = 7\,737 \text{ м}^2$.

Рассмотрим несколько вариантов оценки приходящего на территорию предприятия солнечного излучения (R , кВт·ч/год) относительно суммарной площади фотоэлектрических модулей ($S_{\text{фэм}}$, м²), суммарной площади ограждающих конструкций крыш зданий ($S_{\text{ок}}$, м²),

суммарной площади ограждающих конструкций крыш зданий с учетом исключения зон затенения ($S_{\text{ОКсз}} = 2381 \text{ м}^2$), площади территории предприятия (S , м^2).

Вариант 1: все крыши зданий заполнены фотоэлектрическими модулями, установленными под углом к ограждающей конструкции; взаимное затенение зданий не учитывается ($S_{\text{ФЭМ}} = 6902,8 \text{ м}^2$).

Вариант 2: все крыши зданий заполнены фотоэлектрическими модулями, установленными под углом к ограждающей конструкции; из расчета исключены для установки фотоэлектрических модулей зоны затенения ($S_{\text{ФЭМ}} = 2377,5 \text{ м}^2$).

Вариант 3: все крыши зданий, кроме горизонтальных, заполнены фотоэлектрическими модулями, установленными под углом к ограждающей конструкции; на горизонтальных ограждающих конструкциях фотоэлектрические модули установлены под оптимальным углом в пространстве для обеспечения максимального потока на их приемной поверхности; расстояние между рядами определяется исходя из оптимальных условий затенения и рационального использования выделенных площадок; из расчета исключены для установки фотоэлектрических модулей зоны затенения ($S_{\text{ФЭМ}} = 955,15 \text{ м}^2$).

На рисунке 2 представлены значения удельного годового ресурса солнечной энергии для различных вариантов заполнения территории предприятия фотоэлектрическими модулями, отнесенные к площади территории предприятия (R/S , $\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2\cdot\text{год}$), суммарной площади ограждающих конструкций крыш зданий ($R/S_{\text{ОК}}$, $\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2\cdot\text{год}$), суммарной площади ограждающих конструкций крыш зданий с учетом исключения зон затенения ($R/S_{\text{ОКсз}}$, $\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2\cdot\text{год}$), суммарной площади установленных фотоэлектрических модулей ($R/S_{\text{ФЭМ}}$, $\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2\cdot\text{год}$).

Как видно из рисунка 2, годовой ресурс утилизируемой солнечной энергии с учетом ландшафтных и строительных особенностей территории рассматриваемого предприятия может быть реализован на 12% и 11% относительно валового и максимального значений ресурса солнечной энергии рассматриваемого региона при условии, что все крыши зданий заполнены фотоэлектрическими модулями, установленными под углом к ограждающей конструкции, а взаимное затенение зданий не учитывается. При этом на приемную площадь поверхности фотоэлектрических модулей приходится $1250,9 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2\cdot\text{год}$, что соизмеримо с валовым потенциалом региона и составляет 87% от максимально возможного. При учете режима инсоляции территории площадь, которую можно выделить под установку фотоэлектрических модулей, сокращается в 3,5 раза (с 7737 м^2 до 2381 м^2), а реализуемый потенциал со всей территории объекта исследования – до 4% от валового и максимального его значений, при этом сокращается и ресурс солнечной энергии, приходящей на суммарную площадь ограждающих конструкций зданий (в 2,9 раза), однако относительно площади используемых под установку моделей рассматриваемая величина возрастает на 11%, и валовый потенциал солнечной энергии реализуется полностью для такого варианта компоновки фотоэлектрических систем, а максимальный ресурс – на 87% (на приемную площадь поверхности фотоэлектрических модулей приходится также около 87% от максимально возможного ресурса региона).

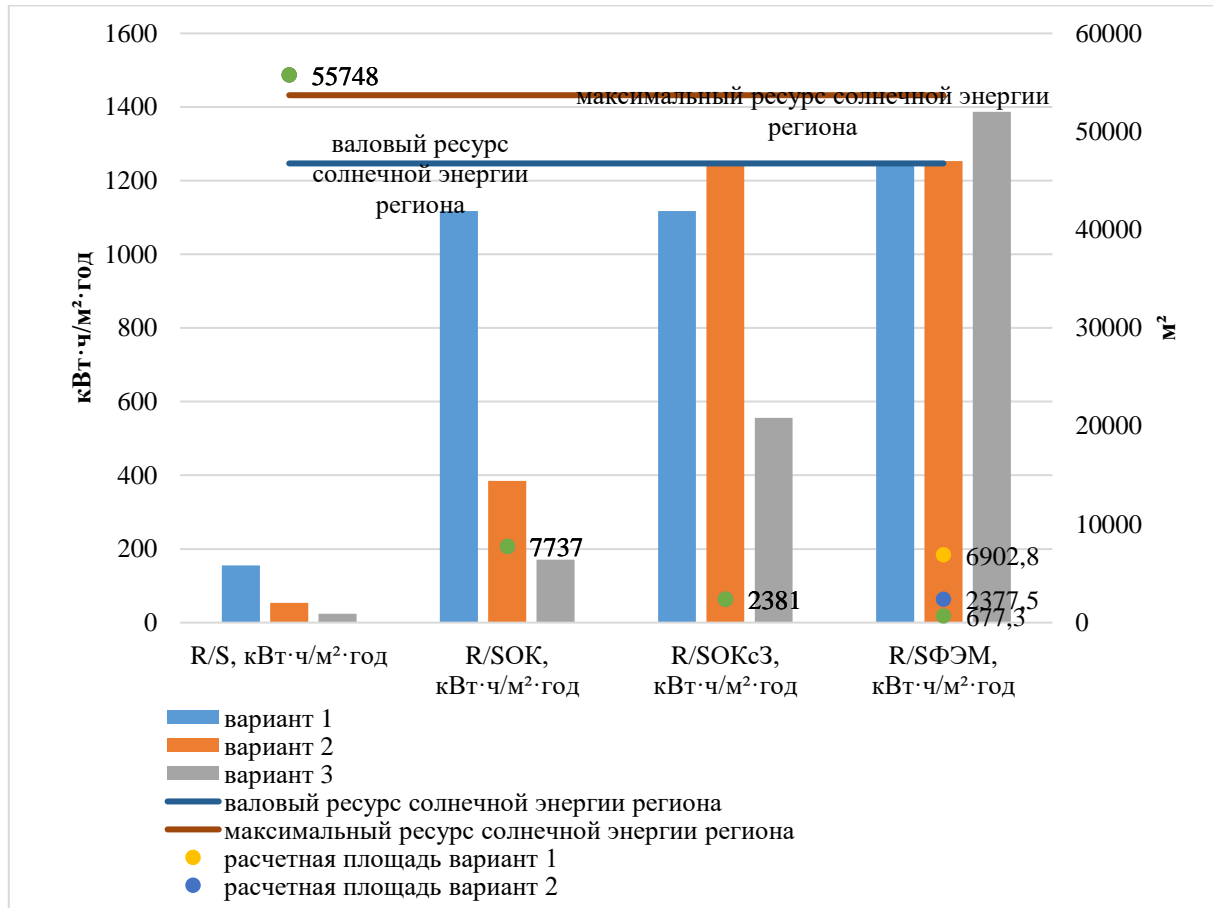


Рисунок 2. Оценка удельного годового ресурса солнечной энергии для различных вариантов заполнения территории предприятия фотоэлектрическими модулями
Figure 2. Estimation of the specific annual solar energy resource for various options for filling the enterprise territory with photovoltaic modules

Если все крыши зданий, кроме горизонтальных, заполнить фотоэлектрическими модулями, установленными под углом к ограждающей конструкции, а горизонтальные ограждающие конструкции – фотоэлектрическими модулями, установленными под оптимальным углом в пространстве при расстоянии между рядами для обеспечения оптимальных условий затенения и рационального использования выделенных площадок, и исключить из расчета для установки зоны затенения, то утилизируемый ресурс со всей площади предприятия уменьшится до 2% относительно валового и максимального значений, а удельный годовой поток относительно площади ограждающих конструкций зданий, выделенных под их установку, уменьшится до 45% относительно валового и 39% относительно максимального значения, но на приемной поверхности фотоэлектрического модуля величина годового ресурса солнечной энергии составит 97% от максимально возможного.

Выводы. Валовый потенциал солнечной энергии для южных регионов Российской Федерации составляет примерно 1250 кВт·ч/м²·год; если оптимально ориентировать приемную поверхность модулей фотоэлектрической батареи в пространстве, то поток солнечного излучения за год на его поверхности может достигнуть 1400 кВт·ч/м²·год. Но в условиях ландшафтных и строительных особенностей территории объекта АПК эта величина может снижаться существенно как относительно площади территории потребителя, так и

относительно площади участков, занимаемых фотоэлектрической батареей: до 1–2% и 40–45% соответственно. Учет условий затенённости территории объекта АПК, особенностей взаимного и пространственного размещения модулей в фотоэлектрической батарее, пространственной ориентации участков, выделенных для их установки, позволяет обеспечить максимальный поток солнечного излучения на поверхности каждого установленного модуля: 95–978% от максимально его возможного значения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Akshay Kaleshwarwar, Sarika Bahadure. Assessment of the solar energy potential of diverse urban built forms in Nagpur, India // *Sustainable Cities and Society*. – 2023. – Vol. 96. – 104681. – 10.1016/j.scs.2023.104681.
2. Gabriela Koster, Wilfried van Sark, Britta Ricker. Solar potential for social benefit: Maps to sustainably address energy poverty utilizing open spatial data in data poor settings // *Energy for Sustainable Development*. – 2024. – Vol. 80. – 101453. – 10.1016/j.esd.2024.101453.
3. Raman Kumar, et al. Rooftop solar potential in micro, small, and medium size enterprises: An insight into renewable energy tapping by decision-making approach // *Solar Energy*. – 2024. – Vol. 276. – 112692. – 10.1016/j.solener.2024.112692.
4. Guannan Li, et al. A district-scale spatial distribution evaluation method of rooftop solar energy potential based on deep learning // *Solar Energy*. – 2024. – Vol. 268. – 112282. – 10.1016/j.solener.2023.112282
5. Jia Tian, Ryoza Ooka Evaluation of solar energy potential for residential buildings in urban environments based on a parametric approach // *Sustainable Cities and Society*. – 2024. – Vol. 106. – 105350. – 10.1016/j.scs.2024.105350.
6. Yaning An, et al. Solar energy potential using GIS-based urban residential environmental data: A case study of Shenzhen, China // *Sustainable Cities and Society*. – 2023. – Vol. 93. – 104547. – 10.1016/j.scs.2023.104547.
7. Hongying Zhao, Rebecca Jing Yang, Chengyang Liu, Chayn Sun Solar building envelope potential in urban environments: A state-of-the-art review of assessment methods and framework // *Building and Environment*. – 2023. – Vol. 244. – 110831. – DOI: 10.1016/j.buildenv.2023.110831.
8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016612047 Российская Федерация. Оценка потенциала солнечной энергии в заданной точке Южного федерального округа : № 2015662511 : заявл. 18.12.2015: опубл. 18.02.2016 / Ю. В. Даус, В. В. Харченко, И. В. Юдаев ; заявитель ФГБОУ ВО Донской ГАУ.
9. Даус, Ю.В. Оценка потенциала солнечной энергии Южного федерального округа / Ю. В. Даус // *Инновации в сельском хозяйстве*. – 2015. – № 4(14). – С. 190-193.
10. Даус, Ю.В. Анализ географического ресурса солнечной энергии территории объекта АПК / Ю. В. Даус // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. – 2023. – Т. 18, № 3(71). – С. 76-83.
11. Increasing Solar Radiation Flux on the Surface of Flat-Plate Solar Power Plants in Kamchatka Krai Conditions / Y. V. Daus, I. V. Yudaev, K. A. Pavlov, V. V. Dyachenko // *Applied Solar Energy*. – 2019. – Vol. 55, No. 2. – P. 101-105. – 10.3103/S0003701X19020051.
12. Daus, Yu. V. Managing Spatial Orientation of Photovoltaic Module to Obtain the Maximum of Electric Power Generation at Preset Point of Time / Yu. V. Daus, V. V. Kharchenko, I. V. Yudaev // *Applied Solar Energy*. – 2018. – Vol. 54, no. 6. – P. 400-405. – 10.3103/S0003701X18060051.

REFERENCES

1. Akshay Kaleshwarwar, Sarika Bahadure (2023) 'Assessment of the solar energy potential of diverse urban built forms in Nagpur, India', *Sustainable Cities and Society*, vol. 96, 104681, 10.1016/j.scs.2023.104681.
2. Gabriela Koster, Wilfried van Sark, Britta Ricker (2024) 'Solar potential for social benefit: Maps to sustainably address energy poverty utilizing open spatial data in data poor settings', *Energy for Sustainable Development*, vol. 80, 101453, 10.1016/j.esd.2024.101453.
3. Raman Kumar, et al. (2024) 'Rooftop solar potential in micro, small, and medium size enterprises: An insight into renewable energy tapping by decision-making approach', *Solar Energy*, vol. 276, 112692, 10.1016/j.solener.2024.112692.
4. Guannan Li, et al. (2024) 'A district-scale spatial distribution evaluation method of rooftop solar energy potential based on deep learning', *Solar Energy*, vol. 268. – 112282, 10.1016/j.solener.2023.112282
5. Jia Tian, Ryoza Ooka (2024) 'Evaluation of solar energy potential for residential buildings in urban environments based on a parametric approach', *Sustainable Cities and Society*, vol. 106, 105350, 10.1016/j.scs.2024.105350.
6. Yaning An, Tianyi Chen, Lei Shi, Chye Kiang Heng, Jinglin Fan (2023) 'Solar energy potential using GIS-based urban residential environmental data: A case study of Shenzhen, China', *Sustainable Cities and Society*, vol. 93, 104547, 10.1016/j.scs.2023.104547.
7. Hongying Zhao, Rebecca Jing Yang, Chengyang Liu, Chayn (2023) 'Sun Solar building envelope potential in urban environments: A state-of-the-art review of assessment methods and framework', *Building and Environment*, vol. 244, 110831, 10.1016/j.buildenv.2023.110831.
8. Certificate of state registration of a computer program No. 2016612047 Russian Federation. *Assessment of solar energy potential at a given point in the Southern Federal District*: No. 2015662511: application. 12/18/2015: publ. 02/18/2016 / Yu. V. Daus, V. V. Kharchenko, I. V. Yudaev; applicant FSBEI HE Don State Agrarian University.
9. Daus, Yu. V. (2015) 'Assessment of the solar energy potential of the Southern Federal District', *Innovations in agriculture*, vol. 14, no. 4, pp. 190-193.
10. Daus, Yu. V. (2023) 'Analysis of the geographical resource of solar energy on the territory of an agro-industrial complex object', *Bulletin of the Kazan State Agrarian University*, vol. 18, no. 3 (71), pp. 76-83.
11. Daus Y. V., Yudaev I. V., Pavlov K. A., Dyachenko V. V. (2019) 'Increasing Solar Radiation Flux on the Surface of Flat-Plate Solar Power Plants in Kamchatka Krai Conditions', *Applied Solar Energy*, vol. 55, no. 2, pp. 101-105, 10.3103/S0003701X19020051.
12. Daus, Yu. V., Kharchenko V. V., Yudaev I. V. (2018) 'Managing Spatial Orientation of Photovoltaic Module to Obtain the Maximum of Electric Power Generation at Preset Point of Time', *Applied Solar Energy*, vol. 54, no. 6, pp. 400-405, 10.3103/S0003701X18060051.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Юлия Владимировна Даус, кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники, теплотехники и возобновляемых источников энергии, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина», Краснодар, Россия; <http://orcid.org/0000-0001-9120-7637>; SPIN-код: 6048-0509; Scopus Author ID: 57191261343; Researcher ID: ABB-5354-2020; e-mail: zirochka2505@gmail.com.

Игорь Викторович Юдаев, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электроснабжения, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина», Краснодар, Россия; <http://orcid.org/0000-0002-3435-4873>; SPIN-код: 6836-5529; Scopus Author ID: 57191251878; Researcher ID: ААН-8298-2019; e-mail: etsh1965@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yulia V. Daus, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Electrical, Heat Engineering and Renewable Energy Sources Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin", Krasnodar, Russia; <http://orcid.org/0000-0001-9120-7637>; SPIN-code: 6048-0509; Scopus Author ID: 57191261343; Researcher ID: ABB-5354-2020; e-mail: zirochka2505@gmail.com.

Igor V. Yudaev, Doc. Sci. (Tech.), Professor, Professor of the Electrical Supply Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin", Krasnodar, Russia; <http://orcid.org/0000-0002-3435-4873>; SPIN-code: 6836-5529; Scopus Author ID: 57191251878; Researcher ID: ААН-8298-2019; e-mail: etsh1965@mail.ru.

Авторский вклад. Все авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении и анализе данного исследования. Все авторы настоящей статьи ознакомились и одобрили представленный окончательный вариант.

Author's contribution. All authors of this research paper have directly participated in the planning, execution, or analysis of this study. All authors of this paper have read and approved the final version submitted.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Received 12.07.2024
Поступила после рецензирования / Revised 03.09.2024
Принята к публикации / Accepted 04.09.2024

Научная статья / Original article

УДК 628.979:581.035

Код ВАК: 4.3.2

DOI: 10.24411/2078-1318-2024-3-146-155

ЭФФЕКТИВНОСТЬ СВЕТОКУЛЬТУРЫ ТОМАТА С ГИБРИДНЫМ ОБЛУЧЕНИЕМ

Е.Н. Ракутько¹  

¹Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства

(ИАЭП) – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ

г. Пушкин, г. Санкт-Петербург, Россия

 elena.rakutko@mail.ru

Реферат. Производство овощей закрытого грунта с применением технологии досвечивания является одной из приоритетных отраслей АПК. Наибольшее распространение в светокультуре в качестве источников излучения получили натриевые лампы (НА). Однако спектр их излучения не вполне подходит для растений. Улучшение эффективности облучательной установки возможно с применением светодиодных (СД) источников, но и они не лишены недостатков. В работе рассмотрена возможность совместного использования в стандартной облучательной установке с НА источниками корректоров спектра на СД источниках. Рабочая гипотеза исследования: повышение эффективности светокультуры возможно путем использования гибридной облучательной установки из основных стандартных НА облучателей и относительно маломощных дополнительных СД облучателей – корректоров спектра, дополняющих спектр основных источников и конструктивно разнесенных с ними. Целью является экспериментальная проверка гибридной облучательной установки в светокультуре томата в условиях промышленной теплицы. Производственные испытания проводили в блоке теплиц 0,5 га. Облучатели с НА источниками размещали над каждым рядом растений с шагом 2 м. Коррекцию спектра НА ламп ДНаТ / Reflux super 400 с фотонным потоком 630 мкмоль/с производили СД корректорами с потоком в синей части 85,1 мкмоль/с и в дальнекрасной 50,4 мкмоль/с. Применение корректоров увеличило интегральный поток на 20%. Электрическая мощность корректора составляла 60 Вт. Корректоры спектра размещали в шахматном порядке в промежутках между основными облучателями. Сравнительный эксперимент на урожайность проводили на сорте томата Encore F1. Эксперимент показал, что увеличение урожайности под гибридной облучательной установкой составило 20%. При капитальных вложениях 4,2 млн руб. и дополнительном расходе электроэнергии 100 тыс. кВт·ч проект по внедрению гибридного облучения окупается за 1,6 года.


Ключевые слова: светокультура, гибридная облучательная установка, натриевые лампы, светодиоды

Для цитирования: Ракутько, Е.Н. Эффективность светокультуры томата с гибридным облучением // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2024. – № 3 (75). – С. 146–155. – DOI: 10.24411/2078-1318-2024-3-146-155.

Благодарности. Автор выражает благодарность работникам НПО «ПсковАгроинновации» за изготовленные источники света; руководству тепличного комбината Межвиди за возможность постановки эксперимента; коллективу лаборатории энергоэкологии светокультуры (ИАЭП) за помощь в проведении исследований.

THE EFFECTIVENESS OF A TOMATO PLANT LIGHTING WITH HYBRID IRRADIATION

E.N. Rakutko¹  

¹Institute of Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) –
Branch of FSAC VIM,
St. Petersburg, Pushkin, Russia
 elena.rakutko@mail.ru

Abstract. Greenhouse cultivation of vegetables under additional lighting is a priority branch of the agro-industrial complex. High-pressure sodium (HPS) lamps are the most widespread irradiation sources in greenhouse crop growing. However, their radiation spectrum is not quite suitable for plants. Improving the efficiency of irradiation installations is possible with the use of light-emitting diodes (LED). However, they also have some drawbacks. The study considered the possibility of using LED-based spectrum correctors in a standard irradiation installation with HPS lamps. Working hypothesis of the study is that increasing the efficiency of plant lighting is possible by using a hybrid irradiation installation consisting of the main standard HPS irradiators and relatively low-power additional LED irradiators – spectrum correctors, complementing the spectrum of the main sources and structurally spaced from them. The study aim was to test a hybrid irradiation installation in tomato cultivation in an industrial greenhouse. Production tests took place in a block of greenhouses with an area of 0.5 ha. Irradiators with HPS lamps were spaced above each row of plants at an interval of 2 m. The spectrum of lamps HPS / Reflux super 400 with a photon flux of 630 $\mu\text{mol/s}$ was corrected using an LEDs with a flux in the blue range of 85.1 $\mu\text{mol/s}$ and in the far-red range 50.4 $\mu\text{mol/s}$. The use of a correctors increased the integral flow by 20%. The electric power of the corrector was 60 W. Spectrum correctors were placed in staggered order between the main irradiators. Comparative experiment on the yielding capacity used Encore tomato variety. The experiment showed that the increase in yield under the hybrid irradiation unit was 20%. With capital investments of 4.2 million roubles and an additional electricity consumption of 100 thousand kWh, the payback period of the hybrid irradiation project will be 1.6 years.

Key words: plant lighting, hybrid irradiation installation, high-pressure sodium lamp, LED

For citation: Rakutko, E.N. (2024) 'The effectiveness of tomato plant lighting with hybrid irradiation', *Izvestiya of Saint-Petersburg State Agrarian University*, vol. 77, no. 3, pp. 146–155. (In Russ.) DOI: 10.24411/2078-1318-2024-3-146-155.

Acknowledgements. Author would like to thank the employees of the NPO “PskovAgroinnovations” for the manufactured light sources; the management of the Mezvidi plant house for the opportunity to set up the experiment; to the team of the Laboratory of Energy Ecology of Plant Lighting (IEEP) for assistance in conducting research.

Введение. Аграрное производство в целом (и овощеводство закрытого грунта в том числе) в последнее время демонстрирует стремительные темпы развития [1]. Производство овощей закрытого грунта с применением технологии досвечивания признано одной из приоритетных отраслей АПК [2]. Высокая энергоемкость тепличной отрасли заставляет искать пути ее снижения, прежде всего, путем внедрения энергосберегающих технологий [3]. Для современных тепличных комплексов эти вопросы более актуальны по сравнению с другими отраслями АПК [4].

Наряду с вопросами энергоэффективности серьезной проблемой является экологичность производства [5]. Важнейшим из экологических факторов для растений выступает фотосинтетически активная радиация (ФАР) в диапазоне 400...780 нм. Естественный источник энергии в этом диапазоне – Солнце. При выращивании растений в контролируемых условиях светокультуры (в теплицах, на сити-фермах и т. д.) применяют источники искусственного излучения, из которых наибольшее распространение получили натриевые (НА) источники.

Многочисленными исследованиями выявлено влияние параметров оптического излучения на рост и развитие растений [6]. Установлено, что важна не только общая интенсивность облучения ФАР, но и ее доли в различных спектральных диапазонах: в синем *B (blue)* – 400...500 нм, в зеленом *G (green)* – 500...600 нм, в красном *R (red)* – 600...700 нм и в дальнекрасном *FR (far-red)* – 700..780 нм, задаваемые коэффициентами k_B , k_G , k_R , k_{FR} , а также их отношениями $k_{R/B}$ и $k_{R/FR}$.

Повышение эффективности светокультуры возможно с применением светодиодных (СД) источников [7]. Их преимущества – высокая фотонная отдача, возможность гибкого управления, прочность, надежность, большой ресурс и экологичность. Однако они не лишены недостатков: установки на СД имеют значительную материалоемкость, большой вес и высокую стоимость [8]. В силу этого внедрение СД в теплицах к настоящему времени имеет ограниченный характер [9], замена НА источников на СД в промышленной тепличной светокультуре в ближайшей перспективе едва ли возможна [10].

На рисунке 1 представлены характеристики ряда тепличных облучателей (информация с Internet-сайтов производителей на май 2024 г.).

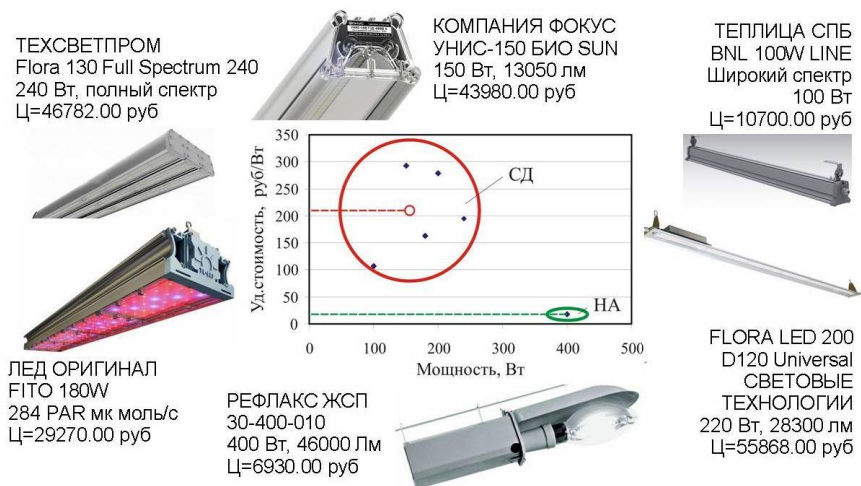


Рисунок 1. Сравнение экономичности тепличных облучателей
Figure 1. Comparison of greenhouse irradiators efficiency

Анализ стоимости единицы электрической мощности (диаграмма в центре рисунка 1) свидетельствует, что для СД облучателей эта величина составляет 107–293 руб/Вт. Для НА облучателя (в примере взят ЖСП 30) эта величина составляет 17 руб/Вт, т. е. на порядок меньше. Большая фотонная отдача СД не может компенсировать их дороговизну по сравнению с НА облучателями. Исследователи отмечают, что в условиях такой разницы в

стоимости СД и НА излучателей оптимальным решением может стать совместное применение излучателей различных типов [11, 12].

Целью работы является экспериментальная проверка работы гибридной облучательной установки в светокультуре томата в условиях теплицы и оценка ее эффективности.

Материалы, методы и объекты исследования. Для проведения производственного эксперимента был разработан корректор спектра, устройство которого показано на рисунке 2. Электрическое питание от сети 220 В поступает на драйвер 1. Из конструктивных соображений наиболее приемлем драйвер типа НВG, имеющий круглую форму. Драйвер крепится к пассивной системе охлаждения (радиатору) 2 с помощью проставок сверху. К нижней части к радиатору на термопасте и крепежных винтах присоединена светодиодная СОВ (*chip on board*) матрица 3, содержащая в необходимой пропорции кристаллы, генерирующие поток оптического излучения необходимой интенсивности в определенных спектральных диапазонах. Для формирования требуемого пространственного распределения потока используется линза 4. В предварительном эксперименте было найдено, что угол рассеивания линзы должен составлять 90°. Вес корректора составляет 5 кг [13].



Рисунок 2. Устройство корректора
 Figure 2. Corrector device

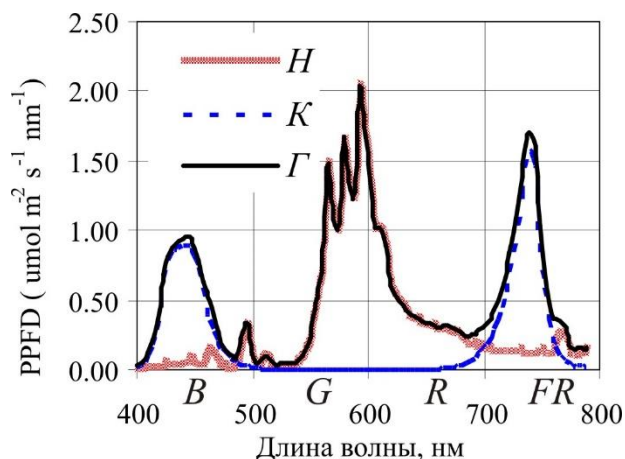


Рисунок 3. Спектры излучения источников
 Figure 3. Radiation spectra of sources

Был произведен расчет спектрального состава и мощности корректора для НА лампы мощностью 400 Вт. Опытная партия корректоров была изготовлена на НПО «Псковагроинновации» [14]. На рисунке 3 показан спектр излучения НА излучателя (*H*), корректора (*K*) и излучения от гибридной облучательной установки (*G*).

Исходными данными для расчета корректора служат поток ФАР НА лампы Φ^H и спектр ее излучения, задаваемый долями энергии в отдельных спектральных диапазонах k_B , k_G , k_R , k_{FR} , а так же отношения $k_{R/B}$ и $k_{R/FR}$, отн. ед.

Потоки НА лампы в отдельных спектральных диапазонах, мкмоль·с⁻¹:

$$\Phi_B^H = k_B \Phi^H; \Phi_G^H = k_G \Phi^H; \Phi_R^H = k_R \Phi^H, \Phi_{FR}^H = k_{FR} \Phi^H. \quad (1)$$

Гибридная установка должна обеспечивать следующие спектральные соотношения потоков излучения:

$$\Phi_R^\Gamma / \Phi_B^\Gamma = k_{R/B} \text{ отн. ед. и } \Phi_R^\Gamma / \Phi_{FR}^\Gamma = k_{R/FR}, \text{ отн. ед.} \quad (2)$$

В красном спектральном диапазоне коррекция не производится, поэтому $\Phi_R^\Gamma = \Phi_R^H$. Тогда потоки в корректируемых диапазонах, мкмоль·с⁻¹:

$$\Phi_B^\Gamma = \frac{\Phi_R^H}{k_{R/B}}; \Phi_{FR}^\Gamma = \frac{\Phi_R^H}{k_{R/FR}}.$$

Добавки от корректора, мкмоль·с⁻¹:

$$\Phi_B^K = \Phi_B^\Gamma - \Phi_B^H; \Phi_{FR}^K = \Phi_{FR}^\Gamma - \Phi_{FR}^H. \quad (3)$$

Поток корректора, мкмоль·с⁻¹:

$$\Phi^K = \Phi_B^K + \Phi_{FR}^K. \quad (4)$$

Поток гибридного облучателя, мкмоль·с⁻¹:

$$\Phi^\Gamma = \Phi^H + \Phi^K. \quad (5)$$

Фотонная отдача, $\mu\text{mol}/\text{Дж}$:

$$\eta = \frac{\Phi}{P}, \quad (6)$$

где Φ – поток источника, мкмоль·с⁻¹;

P – его электрическая мощность, Вт.

Спектры источников измеряли прибором ТКА-ПКМ.

Производственные испытания проводили в тепличном хозяйстве Межвиди (Латвия), ООО «LATGALES DARZENU LOGISTIKA» в теплице 0,5 га (56°44'42,2"N 27°32'32,4"E). Размеры зоны выращивания томата: длина рядов 58,75 м, ширина зоны выращивания 80 м, ее площадь 4700 м² (рисунок 4). Облучатели с НА источниками размещали над каждым рядом с растениями в количестве 29 шт. с шагом 2 м. Количество рядов облучателей 40. Общее количество облучателей составляет 29 x 40 = 1160 шт.

СД корректоры спектра размещали в промежутках между основными НА облучателями в шахматном порядке (рисунок 5). Количество корректоров в ряду равно количеству основных облучателей. В теплице выращивался сорт томата *Encore F1*. Сбор плодов производили раздельно для 2 экспериментальных рядов (с корректором) и 2 контрольных, выбранных на удалении от экспериментальной зоны и от краев теплицы.

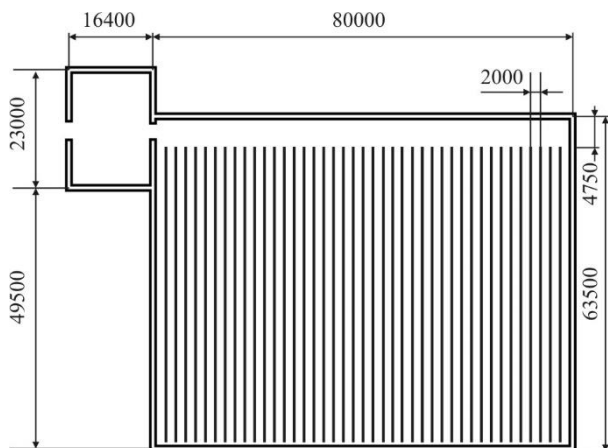


Рисунок 4. План теплицы
 Figure 4. Greenhouse plan



Рисунок 5. Расположение корректоров
 Figure 5. Location of correctors

Учет урожая вели весовым методом. Значимость различий средних значений урожайности определяли с помощью дисперсионного анализа в программе *Statistica*.

Результаты исследования. Перед проведением биологического эксперимента измерили спектры излучения различных марок натриевых ламп. Спектр излучения (доли потока энергии в *R*, *G*, *B* и *FR* диапазонах) и спектральные соотношения $k_{R/B}$ и $k_{R/FR}$ у ряда марок НА ламп приведены в таблице 1.

Таблица 1. Доля потока, %, и спектральные соотношения, отн. ед., разных марок натриевых ламп

Table 1. Flow share, %, and spectral ratios, rel. u., of different brands of HPS lamps

Показатель	Спектр излучения				Соотношения	
	k_B	k_G	k_R	k_{FR}	$k_{R/B}$	$k_{R/FR}$
Master Green Power Plus 600	5.2	41.7	43.4	9.8	8.3	4.4
ДНаТ супер 600	5.2	52.8	33.1	8.9	6.4	3.7
Planta Star 600	5.9	40.3	43.0	10.8	7.3	4.0
ДНаТ 400	6.5	50.4	34.0	9.0	5.2	3.8
ДНаТ 250	6.9	47.0	36.1	9.9	5.2	3.6
Planta Star 250	6.0	52.0	33.4	8.6	5.6	3.9
Лисма 250	6.9	44.6	37.3	11.2	5.4	3.3
Среднее значение	6.1	48.1	36.2	9.6	6.0	3.8

Было найдено, что у всех исследованных марок НА ламп в диапазонах *B* и *FR* спектра доля энергии относительно мала (в среднем соответственно 6,1% и 9,6%). Основной поток излучения сосредоточен в диапазоне *G* (48,1%). Соотношение $k_{R/B}$, которое при оптимальном спектре должно быть близко к 1,7 отн. ед., составляет от 5,2 до 8,3 (в среднем 6,0 отн. ед.). Соотношение $k_{R/FR}$, которое должно быть порядка 2,0 отн. ед, составляет от 3,3 до 4,4 (в среднем 3,8 отн. ед), т. е. имеет место недостаток потока в диапазонах *B* и *FR*. Коррекцию

спектра произвели добавлением к потоку от НА ламп потока от СД ламп, входящих в состав матрицы СОВ и излучающих в этих диапазонах.

У лампы ДНаТ / Reflux super 400 фотонный поток составляет $\Phi^H = 630$ мкмоль·с⁻¹ ($\Phi_B^H = 40,9$; $\Phi_G^H = 317,5$; $\Phi_R^H = 214,2$ и $\Phi_{FR}^H = 56,7$ мкмоль·с⁻¹).

У гибридной установки поток в диапазоне *B* составляет $\Phi_B^F = 214,2/1,7 = 126,0$ мкмоль·с⁻¹, в том числе добавка от корректора $\Phi_B^K = 126,0 - 40,9 = 85,1$ мкмоль·с⁻¹. Поток в диапазоне *FR* составляет $\Phi_{FR}^F = 214,2/2,0 = 107,1$ мкмоль·с⁻¹, в том числе добавка от корректора $\Phi_{FR}^K = 107,1 - 56,7 = 50,4$ мкмоль·с⁻¹.

Общий поток корректора составляет $\Phi^K = 85,1 + 50,4 = 135,5$ мкмоль·с⁻¹ (63% *B* и 37% *FR*). Поток от гибридного облучателя $\Phi^F = 630 + 135,5 = 765,5$ мкмоль·с⁻¹, т. е. применение корректора на 20% увеличивает поток облучательной установки. При фотонной отдаче $\eta = 2,5$ мкмоль/Дж электрическая мощность корректора составляет $P = 135,5/2,5 = 54,2$ Вт (блок питания номинальной мощностью 60 Вт).

При расчете экономической целесообразности применения в светокультуре томата гибридной системы облучения приняли следующие исходные данные: цена одного корректора 3000 руб.; облучение осуществляется 3 месяца в году по 16 часов в сутки; тариф на электроэнергию (собственная генерация) составляет 2,5 руб. за кВт·ч; урожайность повышается на 20%; базовая урожайность томатов 50 кг/кв. м.; отпускная цена продукции составляет 100 руб/кг.

Фактически в эксперименте наблюдалось улучшение качества собранных плодов, что было подтверждено органолептическим методом на основании экспертных оценок. Это позволяет продавать продукцию по более высоким ценам. В расчетах эффективности применения гибридного облучения этот фактор не учитывался.

Технико-экономические показатели внедрения гибридной системы облучения сведены в таблицу 2.

Таблица 2. Технико-экономические показатели
 Table 2. Technical and economic indicators

Показатели	Значение
1. Капитальные вложения, тыс. руб.	4210,80
2. Расход электроэнергии, кВт·ч	100224,00
3. Годовые эксплуатационные издержки, тыс. руб/год	1438,40
4. Приведенные затраты, тыс. руб/год	2070,02
5. Годовой экономический эффект, тыс. руб/год	2629,98
6. Срок окупаемости, лет	1,60

Расчеты показывают, что при сравнительно небольших затратах на модернизацию облучательной установки (капитальные вложения 4,2 млн руб. и дополнительный расход электроэнергии 100 тыс. кВт·ч) за счет увеличения урожайности светокультуры окупаемость проекта по внедрению гибридного облучения составляет 1,6 года.

Выводы. Основным источником излучения в теплице с неизменными характеристиками на протяжении всего календарного года служит облучательная установка. С ее помощью осуществляется управление биологическими процессами в растениях, и чем более оптимальны условия световой среды, тем выше полученный в результате урожай. Особенно это актуально для сезонов с недостаточным уровнем естественной радиации.

Облучательные установки с НА источниками находят повсеместное использование в тепличных хозяйствах благодаря мощному потоку ФАР и низкой стоимости. СД источники имеют массу преимуществ, в частности, позволяют гибко управлять спектральным составом потока излучения. Однако при замене НА источники для обеспечения тех же значений мощности облучательная установка становится слишком дорогой.

На наш взгляд, перспективная наилучшая доступная технология светокультуры в теплице заключается в применении гибридной установки из НА облучателей, формирующих основную долю интенсивности оптического излучения, и дополнительных СД облучателей, корректирующих спектральный состав основных источников под требования растений в светокультуре.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдуллаев, М.А. Инвестиционный потенциал тепличных комплексов России / М. А. Абдуллаев, З. К. Абдуллаева, З. А. Сеферова // Горное сельское хозяйство. – 2022. – № 1. – С. 96–99. – <https://doi.org/10.25691/GSH.2022.1.019>.
2. Иванова, Т.А. Анализ российского рынка овощей защищенного грунта // Вестник Российского университета кооперации. – 2022. – № 2 (48). – С. 21–26.
3. Долгих, П.П. Состояние тепличной отрасли в России и перспективы ее развития / П. П. Долгих, М. А. Гончарова // Эпоха науки. – 2021. – № 25. – С. 25–29. – <https://doi.org/10.24412/2409-3203-2021-25-26-29>.
4. Дорохов, А.С. Принципы синергетики и эксергетического моделирования для управления производственными процессами в закрытых искусственных агроэкосистемах (ЗИАЭС) / А. С. Дорохов, А. П. Гришин, А. А. Гришин // Агротехника и энергообеспечение. – 2019. – № 3 (24). – С. 128–139.
5. Ракутько, С.А. Моделирование и численный анализ энергоэкологичности светокультуры / С. А. Ракутько, Е. Н. Ракутько // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2019. – Т. 13. – № 3. – С. 11–17. – <https://doi.org/10.22314/20737599-2019-13-3-11-17>.
6. Meiramkulova, K. et al. (2021) ‘The efficiency of led irradiation for cultivating high-quality tomato seedlings’, *Sustainability*, vol. 13, p. 9426, <https://doi.org/10.3390/su13169426>.
7. Светокультура растений: биофизические и биотехнические основы / А. А. Тихомиров, В. П. Шарупич, Г. М. Лисовский. – Новосибирск: Изд-во Сибирского отделения РАН, 2000. – 213 с.
8. Прокофьев, А. Перспективы применения светодиодов в растениеводстве / А. Прокофьев, А. Туркин, А. Яковлев // Полупроводниковая светотехника. – 2010. – Т. 5. – № 7. – С. 60–63.

9. Прикупец, Л.Б. Светодиодные облучатели: из фитотрона в теплицу? / Л. Б. Прикупец, А. А. Емелин, И. Г. Тараканов // Теплицы России. – 2015. – № 2. – С. 52–56.
10. Пчелин, В.М. Об экономической целесообразности массового внедрения светодиодов в тепличном освещении в настоящее время / В. М. Пчелин, И. Е. Макарова // Теплицы России. – 2017. – № 4. – С. 62–66.
11. Сарычев, Г. Светодиоды и интенсивная светокультура растений / Г. Сарычев, Г. Гаврилкина, А. Туркин, Ю. Репин // Полупроводниковая светотехника. – 2014. – № 1. – С. 70–71.
12. Moerkens, R. The added value of LED assimilation light in combination with high pressure sodium lamps in protected tomato crops in Belgium / R. Moerkens, W. Vanlommel, R. Vanderbruggen, T. Van Delm // Acta Hort. – 2016. – 1134: 119–124. – <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1134.16>.
13. Ракутько, С.А. Применение комбинированного облучения в светокультуре / С. А. Ракутько, Е. Н. Ракутько, М. Р. Аюпов // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2020. – № 2 (14). – С. 46–52. – <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2020-14-2-46-52>.
14. Аюпов, М.Р. О возможности коррекции спектра натриевой лампы с помощью светодиодного источника под требования светокультуры / М. Р. Аюпов, С. А. Ракутько // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. – 2018. – № 94. – С. 5–13.

REFERENCES

1. Abdulaev, M.A., Abdulaeva, Z.K., Seferova Z.A. (2022) 'Investment potential of greenhouse complexes in Russia', *Mountain agriculture*, no. 1, pp. 96–99, <https://doi.org/10.25691/GSH.2022.1.019>.
2. Ivanova, T.A. (2022) 'Analysis of the Russian market of protected soil vegetables', *Bulletin of the Russian University of Cooperation*, vol. 2, no. 48, pp. 21–26.
3. Dolgikh, P.P. Goncharova, M.A. (2021) 'State of the greenhouse industry in Russia and prospects for its development', *Age of Science*, no. 25, pp. 25–29, <https://doi.org/10.24412/2409-3203-2021-25-26-29>.
4. Dorokhov, A.S., Grishin, A.P., Grishin, A.A. (2019) 'Principles of synergetics and exergy modeling for managing production processes in closed artificial agroecosystems (CAAES)', *Agricultural technology and energy supply*, vol. 3, no. 24, pp. 128–139.
5. Rakutko, S.A., Rakutko, E.N. (2019) 'Modeling and numerical analysis of the energy and environmental friendliness of plant lighting', *Agricultural machines and technologies*, vol. 13, no. 3, pp. 11–17, <https://doi.org/10.22314/20737599-2019-13-3-11-17>.
6. Meiramkulova, K., Tanybayeva Z., Kydyrbekova A., Turbekova A., Aytkhozhin S., Zhantasov S., Taukenov A. (2021) 'The efficiency of led irradiation for cultivating high-quality tomato seedlings', *Sustainability*, 13: 9426, <https://doi.org/10.3390/su13169426>.
7. Tikhomirov A.A., Sharupich, V.P., Lisovsky, G.M. (2000) 'Plant lighting: biophysical and biotechnical foundations', Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 213 p.
8. Prokofiev, A., Turkin, A., Yakovlev, A. (2010) 'Prospects for the use of LEDs in crop production', *Semiconductor lighting technology*, vol. 5, no. 7, pp. 60–63.
9. Prikupets, L.B., Emelin, A.A., Tarakanov, I.G. (2015) 'LED irradiators: from phytotron to greenhouse?' *Greenhouses of Russia*, no. 2, pp. 52–56.
10. Pchelin, V.M., Makarova, I.E. (2017) 'On the economic feasibility of mass implementation of LEDs in greenhouse lighting at the present time', *Greenhouses of Russia*, no. 4, pp. 62–66.

11. Sarychev, G., Gavrilkina, G., Turkin, A., Repin, Yu. (2014) 'LEDs and intensive light culture of plants', *Semiconductor lighting technology*, no. 1, pp. 70–71.
12. Moerkens, R., Vanlommel, W., Vander-bruggen, R., Van Delm, T. (2016) 'The added value of LED assimilation light in combination with high pres-sure sodium lamps in protected tomato crops in Belgium', *Acta Hortic*, no. 1134, pp. 119–124, <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1134.16>.
13. Rakutko, S.A., Rakutko, E.N., Ayupov, M.R. (2020) 'Application of combined irradiation in plant lighting', *Agricultural machines and technologies*, vol. 14, no. 2, pp. 46–52, <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2020-14-2-46-52>.
14. Ayupov, M.R., Rakutko, S.A. (2018) 'On the possibility of correcting the spectrum of a sodium lamp using an LED source to meet the requirements of plant lighting', *Technologies and technical means of mechanized production of crop and livestock products*, no. 94, pp. 5–13.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Елена Николаевна Ракутько, научный сотрудник, Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП) – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный аграрный центр ВИМ», г. Пушкин, г. Санкт-Петербург, Россия; <https://orcid.org/0000-0002-3536-9639>, SPIN-код: 1427-3360; e-mail: elena.rakutko@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Elena N. Rakutko, Research Associate, Institute of Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) – branch of Federal State Budgetary Scientific Institution “Federal Scientific Agroengineering Center VIM”, <https://orcid.org/0000-0002-3536-9639>, SPIN-code: 1427-3360; e-mail: elena.rakutko@mail.ru.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов. The author declares no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию / Received 24.05.2024
Поступила после рецензирования / Revised 15.06.2024
Принята к публикации / Accepted 20.08.2024

Научная статья/Original article

УДК 631.174:(470+571)

DOI: 10.24411/2078-1318-2024-3-156-165

ИСТОРИЧЕСКИЕ ВЕХИ АГРОХИМИЧЕСКОЙ СЛУЖБЫ В РОССИИ

А.И. Осипов¹ , А.А. Комаров¹,  А. Суханов¹ ¹Агрофизический научно-исследовательский институт,

г. Санкт-Петербург, Россия

✉ aosipov2006@mail.ru

Реферат. В 2024 г. Агрохимическая служба в России отмечает свое 60-летие. Необходимость ее создания возникла в начале 1960-х гг., когда в стране эффективно стала развиваться химическая промышленность, были разведаны крупные месторождения фосфоритов и калийных руд, стремительно увеличивались объёмы производства и применения минеральных удобрений. Постановлением Совета Министров СССР от 9 апреля 1964 г. № 319 была создана агрохимическая служба, на которую возложили функции агрохимического обследования сельскохозяйственных земель: проведение массовых анализов почвенных образцов, удобрений и растительности, составление агрохимических картограмм земель, разработку рекомендаций по рациональному применению удобрений. В 1976 г. зональные агрохимические лаборатории были преобразованы в проектно-изыскательские станции химизации под методическим руководством ВПНО «Россельхозхимия». Возложенные на них задачи были дополнены разработкой проектно-сметной документации на применение минеральных и органических удобрений, химическую мелиорацию почв, мелиоративную обработку засоленных земель, а также на их комплексное агрохимическое окультуривание. С 1995 г. государственная агрохимическая служба стала заниматься еще и эколого-токсикологическим, радиологическим обследованием с последующей оценкой сельскохозяйственной продукции. На ее базе были организованы испытательные лаборатории и органы по сертификации. Совершенствование структуры агрохимического обслуживания сельскохозяйственных предприятий позволило обеспечить значительный прогресс в области химизации сельского хозяйства страны.

Ключевые слова: агрохимическая служба, реперные участки, плодородие, мониторинг, картограммы, сертификация, антропогенное воздействие

Для цитирования. Осипов, А.И., Комаров, А.А., Суханов, П.А. Исторические вехи агрохимической службы в России. // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2024. – № 3. – С. 156–165. – DOI: 10.24411/2078-1318-2024-3-156-165.

HISTORICAL MILESTONES OF THE AGROCHEMICAL SERVICE IN RUSSIA

A.I. Osipov¹  , A.A. Komarov¹ , P.A. Sukhanov¹ 

¹Agrophysical Research Institute

St. Petersburg, Russia

 aosipov2006@mail.ru

Abstract. In 2024, the Agrochemical Service in Russia celebrates its 60th anniversary. The need for its creation arose in the early sixties, when the chemical industry began to develop rapidly in the country, large deposits of phosphorites and potash ores were explored. The production and application of mineral fertilizers were rapidly increasing. To solve this problem, by Resolution No. 319 of the Council of Ministers of the USSR dated April 9, 1964, an agrochemical service was established, which was entrusted with the functions of agrochemical inspection of agricultural lands. Conducting mass analyses of soil samples, fertilizers and vegetation, compiling agrochemical cartograms of lands, developing recommendations for the rational use of fertilizers. In 1976, the zonal agrochemical laboratories were transformed into design and survey chemicalization stations as part of the Agricultural Chemistry Research Institute. The list of tasks assigned to them was supplemented by the development of design estimates for the use of organic and mineral fertilizers, chemical soil reclamation, reclamation treatment of salt and saline lands, as well as for their complex agrochemical cultivation. Since 1995, the State Agrochemical Service has also been engaged in ecological toxicological, radiological examination with subsequent assessment of agricultural products and soils. Testing laboratories and certification bodies were organized on the basis of the service. The improvement of the structure of agrochemical services for agricultural enterprises has made it possible to ensure significant progress in the field of chemicalization of agriculture in the country.

Keywords: Agrochemical service, reference sites, fertility, monitoring, cartograms, certification, anthropogenic impact

For citation. Osipov, A.I., Komarov, A.A., Sukhanov, P.A. (2024) 'Historical milestones of the agrochemical service in Russia', *Izvestiya of Saint-Petersburg State Agrarian University*, vol. 77, no. 3, pp. 156–165. (In Russ.) DOI: 10.24411/2078-1318-2024-3-156-165.

Результаты исследований. В настоящее время применение удобрений прочно вошло в передовые технологии выращивания сельскохозяйственных культур как главная составляющая получения высоких и устойчивых урожаев. Растет ассортимент макро- и микроудобрений, микробиологических препаратов, средств защиты, с каждым годом совершенствуются приемы и способы их внесения. Широко используются средства дистанционного зондирования, позволяющие определять пестроту почвенного плодородия и с учетом этого дифференцированно вносить средства химизации [1–6].

История развития агрохимии как науки началась с середины XIX в. В 1775 г. А.Т. Болотов опубликовал в трудах Императорского Вольного Экономического Общества (ИВЭО) статью «Об удобрении земель», в которой сформулировал основные принципы минерального питания растений [6, 7]. В дальнейшем стали появляться публикации по использованию навоза, навозной жижи, птичьего помета, иловых отложений, сорной растительности, удобрений из костей, авторами которых были выдающиеся ученые – А.Н. Энгельгардт, Д.И. Менделеев, К.А. Тимирязев и другие. Профессором Петербургского земледельческого института Александром Николаевичем Энгельгардтом в 1860 г. впервые на

почвах Смоленской губернии была показана высокая эффективность фосфоритов, а в 1868 г. в России для получения фосфоритной муки построили первый завод по размолу фосфорита. Большое значение А.Н. Энгельгардт придавал зелёным удобрениям; он писал, что фосфоритная мука и сидерация являются средством для приведения в культурное состояние громадных масс северных земель. 17 марта 1866 г. в трудах ИВЭО появилось интересное сообщение агронома А.П. Людоговского «Об искусственных удобрениях». Оно положило начало созданию географической сети полевых опытов для выяснения закономерностей в действии удобрений по почвенно-климатическим зонам, а профессор Петербургского университета Д.И. Менделеев разработал предложение об организации сельскохозяйственных опытов. Выступая за создание научных основ отечественной агрономии, он считал необходимым проводить их с применением искусственных удобрений. По его инициативе все опыты сопровождалось анализом почв и метеорологическими наблюдениями, на основании которых ученый сделал прогноз об огромной значимости известкования для почв Нечерноземной зоны России. В 1888 г. в Лужском уезде Петербургской губернии в имении барона П.А. Бильдеринга была организована зональная опытная станция, перешедшая в 1895 г. в ведение Департамента земледелия. Все опыты проводились по единой схеме. Применение удобрений на бедных элементами питания почвах России привело к значительному повышению урожайности сельскохозяйственных культур. Эти опыты стали прообразом географической сети опытов с удобрениями в миниатюре, созданной в 40-х гг. XX в. Д.Н. Прянишниковым. Из русских исследователей наибольший вклад в теоретические основы минерального питания растений и обоснование его роли в формировании урожая внесли К.А. Тимирязев и Д.А. Сабинин [7].

В 1931 г. в стране организовали Всесоюзный институт удобрений, агрохимии и агропочвоведения (ВИУА) имени К.К. Гедройца с филиалами и отделениями. Ленинградское отделение ВИУА уже в 1931 г. опубликовало и подготовлено к печати 76 научных работ в области почвенно-географического районирования, химии почв, применения удобрений и известкования почв. В качестве известковых и органических удобрений изучали, гажу, туф, торфотуф, сапропель, торф, навоз, отходы промышленности. В 1956 г. на базе Ленинградского отделения ВИУА и Ленинградской областной сельскохозяйственной опытной и селекционной станций был создан Северо-Западный НИИ сельского хозяйства (СЗНИИСХ), переименованный в 2003 г. в Ленинградский НИИСХ [7].

Необходимость создания агрохимслужбы возникла в начале 1960-х гг., когда в стране быстрыми темпами стала развиваться химическая промышленность, были разведаны крупные месторождения апатитов, фосфоритов, калийных руд. Стремительно наращивались объёмы производства и применения различных видов минеральных удобрений. Однако, как показала практика, организованные в 1946 г. при машинно-тракторных парках (МТС) около 350 агрохимических лабораторий, занимавшиеся рациональным использованием удобрений в хозяйствах, столкнулись с рядом трудностей. При сложившихся объемах работ их усилий оказалось недостаточно, не всегда учитывались почвенно-климатические условия и особенности сельскохозяйственных культур. Делу явно не хватало системности и комплексной научной основы. Поэтому 9 апреля 1964 г. постановлением Совета Министров СССР № 319 «Об организации государственной агрохимической службы в сельском хозяйстве» была создана такая служба. Она включала, наряду с районными, довольно мощные и хорошо оснащенные областные и республиканские агрохимические лаборатории в

количестве 114 единиц. Закреплено их создание было постановлением Совмина РСФСР от 20 мая 1964 г. № 611, эта дата считается днём рождения агрохимслужбы. Возглавил ее Аркадий Михайлович Артюшин, руководитель Главка химизации СССР. Данные учреждения формировались на базе зональных научно-исследовательских институтов, аграрных вузов, а также на сельскохозяйственных опытных станциях. На новую структуру возложили научно-консультационное обеспечение агрохимического обслуживания хозяйств, включающее в себя агрохимическое обследование почв, проведение массовых анализов почвы, удобрений и растительности, составление агрохимических картограмм земель, разработку рекомендаций по эффективному применению удобрений, проведение полевых опытов с удобрениями, определение качества и питательной ценности заготовленных кормов с выдачей рекомендаций по их использованию, контроль качества и условий эффективного хранения поставляемых удобрений и других средств химизации [8, 9]. В то же время в некоторых сельскохозяйственных высших учебных заведениях стали создавать факультеты почвоведения и агрохимии, на которых началась подготовка кадров для системы агрохимслужбы. Все методическое руководство и координацию работы созданной структуры на первых порах закрепили за центральной контрольной агрохимической лабораторией (ЦКАЛ), созданной при ВИУА. Головной организацией Северо-Западной зоны стала Ленинградская агрохимическая лаборатория, директором которой с момента её организации назначен А.С. Кащенко. За 5 лет работы (1964–1969) зональные агрохимические лаборатории накопили большой аналитический материал по анализам почв, кормов и растений, поэтому в целях дальнейшего улучшения научно-методического руководства агрохимической службой постановлением Совета Министров СССР от 21 мая 1969 г. № 357 был создан Центральный институт агрохимического обслуживания (ЦИНАО). Спустя 2 года на базе Ленинградской агрохимической лаборатории организуется Ленинградский филиал ЦИНАО, директором которого остался А.С. Кащенко. Данный филиал одним из первых в стране успешно освоил новые технологии полевых и аналитических исследований почв, став базой для переподготовки руководителей и специалистов других регионов. Сотрудники филиала активно участвовали в разработке и оценке новых методик, предлагаемых для использования в практике агрохимического обслуживания сельского хозяйства. По инициативе руководства и при участии сотрудников института были разработаны порядок и методики обязательного контроля органических удобрений, производимых на животноводческих комплексах, что способствовало сохранению бездефицитного баланса органического вещества в пахотных почвах области. Установленная при проведении повторных агрохимических исследований почв стабильная порайонная очередность существенно повышала достоверность мониторинга изменений почвенного плодородия. В 1976 г. всю структуру преобразовали в проектно-изыскательские станции химизации сельского хозяйства, дополнительно возложив на них разработку проектно-сметной документации по применению органических и минеральных удобрений, мелиоративную обработку солонцов и засоленных земель, известкование кислых почв, а также комплексное агрохимическое их окультуривание. Кроме того, появились функции технологического контроля проведения агрохимических работ, реализация которых должна была в короткие сроки обеспечить повышение плодородия почв до оптимального уровня и формирование запланированной урожайности за счет комплексного внесения минеральных и органических удобрений, химических мелиорантов и средств защиты растений. В эти же годы на базе ЦИНАО создаются радиологические и химико-

токсикологические отделы, укомплектованные необходимым оборудованием и специализированным автотранспортом [8, 9].

Постановлением ЦК КПСС Совмина СССР от 09.08.1979 № 765 «О создании единой специализированной агрохимической службы в стране» в системе Министерства сельского хозяйства СССР было создано Всесоюзное производственно-научное объединение по агрохимическому обслуживанию сельского хозяйства (ВПНО «Союзсельхозхимия»). На данную организацию возложили оказание производственных агрохимических услуг сельскохозяйственным предприятиям. ВПНО «Союзсельхозхимия» и его республиканские, краевые, областные и районные подразделения отвечали за научно обоснованное использование минеральных и органических удобрений, химических и биологических средств защиты растений, мелиорантов почв, кормовых добавок, ростовых веществ и других средств химизации сельского хозяйства во всех колхозах, совхозах и на других государственных сельскохозяйственных предприятиях. В 1981 г. сотрудниками ПО «Томксельхозхимия» была разработана методика комплексного агрохимического окультуривания полей (КАХОП), позволившая непрерывно повышать плодородие сельскохозяйственных земель и гарантировать получение высоких и устойчивых урожаев возделываемых культур с качественными показателями без дополнительного применения удобрений. Данный метод получил широкое распространение по всей стране. С 1986 г. после аварии на Чернобыльской АЭС сотрудники ВПНО «Союзсельхозхимия» принимали активное участие в ликвидации ее последствий. На загрязненных землях проводили радиологическое обследование сельхозугодий, применяли научно обоснованные мероприятия для их очистки, участвовали в разработке и внедрении системы специальных агро-мелиоративных приемов, позволивших значительно снизить содержание радионуклидов в сельхозпродукции. Кроме того, на них было возложено снабжение сельскохозяйственных предприятий средствами химизации и их прикрепление к заводам-поставщикам. В связи с этим учреждения агрохимслужбы провели большую работу по составлению областных схем размещения и строительства прирельсовых и хозяйственных складских помещений для хранения минеральных и известковых удобрений. Новая задача «Союзсельхозхимии» по организации добычи местных известьесодержащих мелиорантов и гипса потребовала открытия в некоторых учреждениях горно-маркшейдерских отделов. Совершенствование структуры агрохимического обслуживания сельскохозяйственных предприятий позволило обеспечить значительный прогресс в области химизации сельского хозяйства страны. В таком виде служба просуществовала до распада Советского союза. В 1991 г. станции вывели из подчинения «Россельхозхимии», а в 1995 г. была воссоздана государственная агрохимическая служба, которая значительно расширила перечень выполняемых агрохимических работ. Было внедрено радиологическое и экологотоксикологическое обследование почв и выращиваемой сельскохозяйственной продукции. Заложена сеть из более 2000 реперных участков для ведения мониторинга плодородия почв по горизонтам до материнской породы, что позволило наработать базу данных о передвижении элементов питания и скорости изменения почвенно-поглощительного комплекса при антропогенном воздействии [9, 10]. На базе службы были организованы испытательные лаборатории и органы по сертификации. Основная деятельность филиала была связана с внедрением вычислительной техники для обработки агрохимической информации и повышения эффективности её использования при решении вопросов агрохимического обслуживания сельского хозяйства Северо-Западного региона РСФСР,

включающего Ленинградскую, Псковскую, Вологодскую, Архангельскую, Калининградскую области, а также Коми и Карельскую АССР. С этой целью с использованием ЭВМ «Минск-32» был создан автоматизированный банк данных, содержащий агрохимическую информацию о почвах на машинных носителях. В его создании непосредственное участие принимали А.С. Кащенко, О.В. Юрлова, И.Н. Ганусевич, Л.М. Любинская, В.Н. Галкин и сотрудники областной агрохимической лаборатории. Одной из основных задач агрохимического обслуживания зоны было решение вопросов известкования кислых почв. С 1972 г. этой проблемой стал заниматься отдел радиологии Ленинградского филиала ЦИНАО, которым руководил Ю.В. Алексеев. С участием программиста М.А. Войчук разрабатывались подходы к определению доз извести с учётом таких параметров, как масса корнеобитаемого слоя известкуемой почвы, гидролитическая кислотность и степень насыщенности основаниями. Были созданы компьютерные программы, позволяющие уточнять дозу извести и составлять проектно-сметную документацию (ПСД) на проведение работ по известкованию почв. В дальнейшем, кроме составления ПСД с использованием автоматизированного банка данных (АБД), совместно с математиком М.К. Эпштейном и программистом Е.П. Ратновской был создан программный комплекс, позволяющий решать ряд вопросов, связанных с известкованием кислых почв. За эту работу сотрудники филиала Ю.В. Алексеев, М.К. Эпштейн, Е.П. Ратновская, Л.С. Зотова были награждены серебряными медалями ВДНХ. В данный комплекс входили следующие программы: «Определение эффективности использования извести путем сравнения результатов двух последующих циклов обследования почв», «Определение прогнозируемой потребности в CaCO_3 для вывода почв на уровень поддерживающего известкования за фиксированное число лет», «Определение потребности в извести, составление ПСД на известкование почв и расчёт экономической эффективности известкования». С помощью динамической математической модели авторы рассчитали необходимый ежегодный фонд мелиорантов для известкования кислых почв Ленинградской области после вывода их на оптимальный уровень кислотности. Эта величина составила 600 тыс. тонн извести в год. В 1985 г. на базе Ленинградского филиала ЦИНАО был создан Всесоюзный, а с 1991 г. Всероссийский научно-исследовательский, конструкторский и проектно-технологический институт химической мелиорации почв (ВНИПТИМ) как единый научно-исследовательский и методический центр страны для решения задач химической мелиорации почв, который возглавил А.И. Мячин [6, 7]. С учетом имеющихся научных разработок в нашей стране и за рубежом, рассматривающих известкование кислых почв как коренное мероприятие по повышению их плодородия и рентабельному ведению хозяйства, были определены следующие основные направления деятельности института:

- совершенствование научных основ и методов использования средств химической мелиорации и охраны окружающей среды;
- поиск, комплексное изучение, внедрение и стандартизация новых источников производства химических мелиорантов почв;
- разработка перспективных агрохимических, технических средств и энергосберегающих технологий, направленных на повышение эффективности качества химической мелиорации почв;
- создание и внедрение нормативной базы применения агрохимикатов, программных комплексов и автоматизированных информационных баз данных с применением ЭВМ для

оптимизации технологических схем производства, транспортирования и использования мелиорантов в различных природно-экономических районах России.

Во ВНИПТИМе под руководством В.Ф. Аршавской и Ю.В. Алексева при участии сотрудников Н.И. Вялушкиной, А.В. Литвиновича, А.С. Оглуздина и др. были проведены исследования по изучению возможности использования бутарного продукта фосфогипса, фосфатно-известкового отхода Кингисеппского химического комбината, в качестве химического мелиоранта. Большой интерес для сельского хозяйства Ленинградской области представляет бутарный продукт, который в измельченном виде может заменить известь и фосфоритную муку. Его внесение в почву в дозе 5 т/га эквивалентно 250 кг P_2O_5 и 2,7 т $CaCO_3$. Была доказана эффективность внесения фосфогипса в дозах до 500 кг/га на карбонатных и произвесткованных почвах, особенно под бобовые и крестоцветные культуры. Предложены приемы и способы экологически безопасного использования в качестве мелиорантов известьсодержащих отходов Прибалтийской ГРЭС, белитовых шламов Канско-Ачинского глиноземного комбината, конверсионного мела, феррохромового шлака, золы торфа, бурых углей и других отходов. Выявлено, что мелиоранты на основе отходов древесных активных углей снижают загрязнение растениеводческой продукции тяжелыми металлами. В целом сотрудниками института было изучено более 23 отходов промышленности в качестве известьсодержащих мелиорантов. Подготовлены, исследованы и аттестованы отраслевые стандартные образцы известковых удобрений для метрологического обеспечения аналитических работ с известковыми удобрениями. Разработан и зарегистрирован в органах Госстандарта на предприятиях новый стандарт «Удобрения известковые местные. Технические условия». Стандартизация местных известковых удобрений – мела, известкового туфа, мергеля, озерной извести, доломитовой и известняковой муки – позволила улучшить качество поставляемых сельскому хозяйству мелиорантов и более рационально использовать местные маломощные источники карбонатного сырья. Сотрудниками лаборатории агроэкологии был создан портативный анализатор карбонатов ПАК-1 для определения нуждаемости почв в известковании по наличию свободных карбонатов, содержания карбонатов (в %) в полевых условиях. Прибор позволил оперативно измерять активность мелиорантов (скорость нейтрализации почвенной кислотности) и изучать ее значение при мелиорации почв, загрязненных радионуклидами и тяжелыми металлами. Создание прибора было защищено авторским свидетельством. В его разработке участвовали Ю.В. Алексеев, Ю.А. Субботин, С.Я. Хнальков. Конструкторско-технологический отдел, возглавляемый Г.Ф. Гриднеевым, разработал принципиально новые универсальные шнековые рабочие органы с изменяемой от 4 до 10 м шириной захвата. Они агрегатировались с МВУ и самоходными агрегатами для дифференцированного внесения минеральных удобрений и извести. Созданные агрегаты повышали качество внесения твердых известковых материалов, сокращали их непроизводительные потери и обеспечивали охрану окружающей среды. Однако ни ПАК-1, ни шнековые рабочие органы не были внедрены в сельскохозяйственное производство нашей страны. В 1998 г. по приказу Российской академии сельскохозяйственных наук ВНИПТИМ вошел в состав Агрофизического института, который и в настоящее время продолжает научные исследования, связанные с известкованием кислых почв. Сотрудниками института было убедительно доказано, что относительно крупные частицы диаметром от 3 до 5 мм не являются «балластом», как считалось ранее, хотя и взаимодействуют с почвой гораздо медленнее, чем мелкие частицы. С увеличением диаметра известковых частиц взаимодействие

их с почвой замедляется. Поэтому для того, чтобы уровень реакции почвы поддерживался относительно постоянным в течение продолжительного времени, известковые материалы должны содержать широкий спектр частиц различного размера. Изменение почвенной реакции в большей мере зависит от дозы внесения извести и буферных свойств почвы, которые определяются содержанием органических и минеральных коллоидов. Для снижения кислотности в легких почвах требуется значительно меньше извести, чем в тяжелых. Таким образом, проблема рационального, наиболее эффективного и экономного использования известковых материалов не может сводиться только к увеличению продолжительности действия извести. Она многообразна и требует глубоких фундаментальных исследований. В Агрофизическом институте с 2013 г. ведутся работы по внедрению усовершенствованной технологии известкования кислых почв сыромолотой доломитовой мукой с тониной помола менее 5 мм с учетом пестроты почвенной кислотности. Специалистами института впервые создан программно-аппаратный комплекс на отечественном оборудовании для дифференцированного внесения известковых мелиорантов и других минеральных удобрений, который был показан на Российском Дне поля 11 июля 2019 г. Комплекс позволяет проводить работы как в обычном режиме (сплошной, одинаковой дозой), так и в режиме «точного земледелия» – дифференцированно. Он изготовлен по новейшим технологиям с применением качественных материалов и с использованием передовых разработок в области электроники, средств управления и мониторинга техники, программного обеспечения. Для выполнения работ в системе «точного земледелия» необходимо предварительно провести агрохимическое обследование сельскохозяйственных полей с топографической привязкой и создать на основе полученных лабораторных данных «карты-задания», которые будут использоваться бортовыми системами комплекса в поле [5]. Для внесения химических мелиорантов в Ярославле фирмой ПК «Ярославич» с 2019 г. выпускаются современные машины УРМ-10 и УРМ-10М (универсальный распределитель материалов). Они доказали свое превосходство перед другими машинами, обладая большей производительностью и надежностью в работе, высоким качеством внесения мелиорантов (неравномерность у новых машин 3–10%, а у старых – 20–25%), а также возможностью работать по точному земледелию с электронными картами полей, позволяющими учитывать пестроту почвенной кислотности. Для реализации программы повышения плодородия почв и увеличения площадей по известкованию в Ленинградской области компанией ООО «Инко-Балт» в 2021 г. смонтированы и введены в эксплуатацию две линии по производству мелиорантов для химической мелиорации кислых почв ДСМ (доломит сыромолотый мелкозернистый) и ПДМ (пылевидная доломитовая мука). В 2022 г. они прошли государственную регистрацию и могут использоваться для известкования кислых почв на территории России. Мощность производства мелиорантов – до 500 000 тонн/г.

Таким образом, своевременное создание в стране агрохимической службы позволило в кратчайшие сроки наладить государственный учет состояния плодородия почв и на его основе разработать научно обоснованное сохранение и восстановление их плодородия для получения высоких и устойчивых урожаев возделываемых культур. В нынешних условиях проведение агрохимического анализа почв актуально во всех регионах РФ. Полученные результаты позволяют своевременно выявить изменения состояния их плодородия и оптимизировать текущие затраты для снижения себестоимости продукции. Интегрированные технологии

комплексного применения средств химизации снижают экологическую нагрузку на окружающую среду и очень выгодны для сельхозтоваропроизводителей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Якушев, В.П., Осипов, А.И. Химическая мелиорация почв – вчера, сегодня, завтра // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2013. – № 30. – С. 68–72.
2. Якушев, В.П., Осипов, А.И., Якушев, В.В. Потенциал развития отрасли растениеводства в РФ с использованием информационных технологий точного земледелия // Продовольственная безопасность: материалы VI Международного форума. – СПб., 2016. – С. 66–73.
3. Гайсин, И.А., Пахомова, В.М. Полифункциональные хелатные микроудобрения. Практика применения и механизм действия. Казань, 2016. – 316 с.
4. Комаров, А.А., Комаров, А.А. Гипотеза проявления физиологической активности гумусовых веществ в аспекте процесса гумификации // Агрохимический вестник. – 2017. №6. С. 49–54.
5. Комаров, А.А., Комаров, А.А. Перспективы использования комплексных агрохимикатов для дифференцированного их внесения в качестве средств управления ростом и развитием растений. // Агрохимический вестник. – 2018. – № 6. – С. 34–41.
6. Осипов, А.И., Якушев, В.П., Якушев, В.В. История научных исследований в агрохимии и перспективы применения удобрений // Агрохимический вестник. – 2020. – № 2. – С. 73–80.
7. Осипов, А.И. Химизация в России и научная основа ее улучшения. // Здоровье – основа человеческого потенциала: проблемы и пути их решения. – 2022. – Т. 17. – № 2. – С. 734–743.
8. Овчаренко, М.М. Сложный путь становления агрохимической службы Министерства сельского хозяйства Российской Федерации // Агрохимический вестник. – 2014. – № 2. – С. 2–3.
9. Чекмарев, П.А. 50 лет агрохимической службы Российской Федерации // Достижения науки и техники АПК. – 2014. – № 4. – С. 3–5.
10. Астахова, А. Сохранение сельхозземель и их рациональное использование имеют определенное значение для развития АПК // Вестник агропромышленного комплекса. – 2022. – № 1–2. – С. 54–58.

REFERENCES

1. Yakushev, V.P., Osipov, A.I. (2013) 'Chemical soil reclamation – yesterday, today, tomorrow', *Izvestiya of Saint-Petersburg State Agrarian University*, no. 30, pp. 68–72. (in Russ.)
2. Yakushev, V.P. Osipov, A.I., Yakushev, V.V. (2016) 'Potential of development of the crop industry in the Russian Federation using information technologies of precision agriculture', *Materials of the Sixth International Forum "Food Security"*, St. Petersburg, pp. 66–73. (in Russ.)
3. Gaisin, I.A., Pakhomova, V.M. (2016) Multifunctional chelated micronutrients. The practice of application and the mechanism of action, Kazan, 316 p. (in Russ.)
4. Komarov, A.A., Komarov, A.A. (2017) 'Hypothesis of the manifestation of the physiological activity of humic substances in the aspect of the humification process', *Agrochemical Bulletin*, 2017, no. 6, pp. 49–54. (In Russ.)
5. Komarov, A.A., Komarov, A.A. (2018) 'Prospects for the use of complex agrochemicals for their differentiated application as means of controlling plant growth and development',

- Agrochemical Bulletin*, no. 6. pp. 34–41. (in Russ.)
6. Osipov, A.I., Yakushev, V.P., Yakushev, V.V. (2020) 'History of scientific research in agrochemistry and prospects for the use of fertilizers', *Agrochemical Bulletin*, no. 2, pp. 73–80. (in Russ.)
 7. Osipov, A.I. (2022) 'Chemicalization in Russia and the scientific basis for its improvement', *Health is the basis of human potential: problems and ways to solve them*, vol. 17, no. 2, pp. 734–743. (in Russ.)
 8. Ovcharenko, M.M. (2014) 'The difficult path of formation of the agrochemical service of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation', *Agrochemical Bulletin*, no. 2, pp. 2–3. (in Russ.)
 9. Chekmarev, P.A. (2014) '50 years of the agrochemical service of the Russian Federation', *Achievements of science and technology of the agro-industrial complex*, no. 4. pp. 3–5. (in Russ.)
 10. Astakhova, A. (2022) 'Conservation of agricultural lands and their rational use are of certain importance for the development of the agro-industrial complex', *Bulletin of the agro-industrial complex*, no. 1–2, pp. 54–58. (in Russ.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Анатолий Иванович Осипов, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, главный научный сотрудник, федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Агрофизический научно-исследовательский институт», Санкт-Петербург, Россия; <https://orcid.org/0009-0003-3181-3792>; SPIN-код: 8023-7429; e-mail: aosipov2006@mail.ru.

Андрей Алексеевич Комаров, доктор сельскохозяйственных наук, главный научный сотрудник, федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Агрофизический научно-исследовательский институт», Санкт-Петербург, Россия; <http://orcid.org/0000-0003-1430-0509>, SPIN-код: 3522-3694; e-mail: zelenydar@mail.ru.

Павел Алексеевич Суханов, доктор сельскохозяйственных наук, главный научный сотрудник, федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Агрофизический научно-исследовательский институт», Санкт-Петербург, Россия; <https://orcid.org/0000-0003-4720-883X>, SPIN-код: 7132-6740; e-mail: pavel_suhanov@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anatoly I. Osipov, Doc. Sci. (Agric.), Professor, Chief Researcher, Federal State Budgetary Institution "Agrophysical Research Institute", St. Petersburg, Russia; <https://orcid.org/0009-0003-3181-3792>; SPIN-код: 8023-7429; e-mail: aosipov2006@mail.ru.

Andrey A. Komarov, Doc. Sci. (Agric.), Chief Researcher, Federal State Budgetary Institution "Agrophysical Research Institute" St. Petersburg, Russia; <http://orcid.org/0000-0003-1430-0509>; SPIN-код: 3522-3694; e-mail: zelenydar@mail.ru.

Pavel A. Sukhanov, Doc. Sci. (Agric.), Chief Researcher, Federal State Budgetary Scientific Institution "Agrophysical Research Institute" 195220, St. Petersburg, Russia; <https://orcid.org/0000-0003-4720-883X>; SPIN-код: 7132-6740; e-mail: pavel_suhanov@mail.ru.

Авторский вклад. Все авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении и анализе данного исследования. Все авторы настоящей статьи ознакомились и одобрили представленный окончательный вариант

Author's contribution. All authors of this research paper have directly participated in the planning, execution, or analysis of this study. All authors of this paper have read and approved the final version submitted

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

The authors declare no conflict of interest

Требования к научным статьям, публикуемым в журнале «Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета»

Уважаемые коллеги!

Санкт-Петербургским государственным аграрным университетом издается журнал «Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета». С 2007 года журнал включен в утвержденный ВАК Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, выпускаемых в РФ, где публикуются основные научные результаты диссертационных работ на соискание ученой степени доктора или кандидата наук, а также в базу данных международной информационной системы AGRIS, в библиографическую базу данных – Российский индекс научного цитирования (РИНЦ) и размещается на официальном сайте ФГБОУ ВО СПбГАУ. Подписной индекс – ВН 017771. Статьям присваивается DOI (цифровой идентификатор объекта). В журнале публикуются статьи по следующим группам специальностей:

- 4.1. Агрономия, лесное и водное хозяйство: 4.1.1. Общее земледелие и растениеводство; 4.1.2. Селекция, семеноводство и биотехнология; 4.1.3. Агрохимия, агропочвоведение, защита и карантин растений; 4.1.4. Садоводство, овощеводство, виноградарство и лекарственные культуры;
- 4.2. Зоотехния и ветеринария: 4.2.4. Частная зоотехния, кормление, технологии приготовления кормов и производства продукции животноводства; 4.2.5. Разведение, селекция, генетика и биотехнология животных;
- 4.3. Агроинженерия и пищевые технологии: 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса; 4.3.2. Электротехнологии, электрооборудование и энергоснабжение агропромышленного комплекса.

Основные требования к статьям, предоставляемым для публикации в журнале:

1. Статья должна соответствовать основным научным направлениям журнала, а также содержать результаты научных исследований, теоретические, практические (инновационные) разработки, готовые для использования и являющиеся актуальными на современном этапе научного развития.
2. Размер текста статьи должен составлять 7–10 страниц на листах А4, шрифт Times New Roman, шрифт 14, межстрочный интервал – 1,5.
3. **В редакцию необходимо предоставить следующие материалы:**

- **текст статьи** на русском языке в бумажной версии (для всех авторов — в электронной; формат файла: doc, docx; на эл.почту izvestiya@spbgau.ru) согласно требованиям к структуре и содержанию статьи с обязательным указанием контактных телефонов авторов;
- **реферат (200–250 слов)** на русском и английском языках; **ключевые слова (не более 7 слов)** на русском и английском языках; **информацию об авторе** (авторах) статьи на русском и английском языках (электронная почта, место работы, адрес места работы).

Правила оформления статьи:

- номер УДК (12 шрифт светлый);
- ученая степень, (шрифт 12 строчный), **и.о. фамилия** (шрифт 12 жирный строчный);
- место работы (шрифт 12 строчный), e-mail (шрифт 12 строчный);
- **название статьи** (шрифт 14 жирный прописной);
- основной текст (шрифт 14 строчный);
- список источников литературы, **References** (шрифт 12 строчный жирный, разреженный).

Текст статьи необходимо структурировать, используя подзаголовки соответствующих разделов: **введение; цель исследования; материалы, методы и объекты исследования; результаты исследования; выводы** (отмечать подзаголовки жирным шрифтом), список источников литературы.

Список литературы: не менее 10 источников, включая иностранные. Приводится на русском и английском языках – **References, стандарт «Harvard»**. Литература должна быть оформлена в соответствии с ГОСТ Р 7.0.100-2018. Список составляется в соответствии с последовательностью ссылок в тексте (в порядке цитирования). Ссылки на литературу в тексте приводятся в квадратных скобках, например [1].

4. Поступившие в редакцию статьи проходят обязательное рецензирование и проверяются на заимствования в программе «Антиплагиат».

Редакция оставляет за собой право на воспроизведение поданных авторами материалов (опубликование, тиражирование) без ограничения тиража экземпляров.

Подробная информация о журнале «Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета» на сайте <http://spbgau.ru/izvestiya>.

Научное издание

ИЗВЕСТИЯ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО АГРАРНОГО
УНИВЕРСИТЕТА

Рецензируемый научный журнал
4 номера в год
№ 3 (77)

Литературная редакция М.А. Ереминой, М.Ю. Раззак
Верстка М.А. Ереминой
Переводчик Н.Г. Коваленко

Подписано к печати 26.09.2024
Формат 60×84 1/8. П. л. 15. Тираж 1000. Заказ
Отпечатано в полном соответствии с качеством предоставленных оригиналов
в Издательско-полиграфическом комплексе
Санкт-Петербургского государственного аграрного университета
г. Пушкин, Петербургское шоссе, д. 2