

ВЕСЦІ

НАЦЫЯНАЛЬнай

АКАДЭМІі НАВУК БЕЛАРУСІ

СЕРЫЯ БІЯЛАГІЧНЫХ НАВУК. 2025. Т. 70, № 1

ИЗВЕСТИЯ

НАЦИОНАЛЬНОЙ

АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ

СЕРИЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ НАУК. 2025. Т. 70, № 1

Журнал основан в 1956 г. как «Весці Акадэміі навук БССР. Серыя біялагічных навук»,
с 1992 г. – «Весці Акадэміі навук Беларусі. Серыя біялагічных навук»,
с 1998 г. – современное название

Выходит четыре раза в год

Учредитель – Национальная академия наук Беларуси

Журнал зарегистрирован в Министерстве информации Республики Беларусь,
свидетельство о регистрации № 395 от 18 мая 2009 г.

*Входит в Перечень научных изданий Республики Беларусь
для опубликования результатов диссертационных исследований, включен в базу данных
Российского индекса научного цитирования (РИНЦ)*

Главный редактор

Олег Юрьевич Баранов – Отделение биологических наук Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь

Редакционная коллегия

- А. В. Кильчевский** (*заместитель главного редактора*) – Президиум Национальной академии наук
Беларуси, Минск, Республика Беларусь
- М. Е. Никифоров** (*заместитель главного редактора*) – Научно-практический центр Национальной
академии наук Беларусі по биоресурсам, Минск, Республика Беларусь
- Т. В. Смирнова** (*ведущий редактор журнала*)
- З. М. Алещенкова** – Институт микробиологии Национальной академии наук Беларусі, Минск, Рес-
публика Беларусь
- И. Д. Волотовский** – Институт биофизики и клеточной инженерии Национальной академии наук Бе-
ларуси, Минск, Республика Беларусь
- А. Е. Гончаров** – Институт биофизики и клеточной инженерии Национальной академии наук Беларусі,
Минск, Республика Беларусь

- В. В. Демидчик** – Институт экспериментальной ботаники имени В. Ф. Купревича Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь
- Н. И. Дубовец** – Институт генетики и цитологии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь
- Л. Ф. Кабашникова** – Институт биофизики и клеточной инженерии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь
- Э. И. Коломиец** – Государственное научно-производственное объединение «Химический синтез и биотехнологии», Минск, Республика Беларусь
- Н. А. Ламан** – Институт экспериментальной ботаники имени В. Ф. Купревича Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь
- В. Е. Падутов** – Институт леса Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Республика Беларусь
- В. Н. Прохоров** – Институт экспериментальной ботаники имени В. Ф. Купревича Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь
- В. Н. Решетников** – Центральный ботанический сад Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь
- В. В. Титок** – Центральный ботанический сад Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь
- В. И. Торчик** – Центральный ботанический сад Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

Редакционный совет

- В. Ф. Багинский** – Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины, Гомель, Республика Беларусь
- А. Баршевский** – Даугавпилский университет, Даугавпилс, Латвийская Республика
- В. Е. Гайдук** – Брестский государственный университет имени А. С. Пушкина, Брест, Республика Беларусь
- Ю. Ю. Дгебуадзе** – Институт проблем экологии и эволюции имени А. Н. Северцова Российской академии наук, Москва, Российская Федерация
- Н. А. Колчанов** – Институт цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Российская Федерация
- В. В. Кузнецов** – Институт физиологии растений имени К. А. Тимирязева Российской академии наук, Москва, Российская Федерация
- В. Олех-Пяэцка** – Варшавский университет естественных наук, Варшава, Республика Польша
- О. Н. Пугачев** – Зоологический институт Российской академии наук, Санкт-Петербург, Российская Федерация
- А. И. Рапопорт** – Институт микробиологии и биотехнологии Латвийского университета, Рига, Латвийская Республика
- И. А. Тихонович** – Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной микробиологии, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Адрес редакции:

ул. Академическая, 1, к. 119, 220072, г. Минск, Республика Беларусь.
Тел.: + 375 17 272-19-19; e-mail: biolvesti@mail.ru
Сайт: vestibio.belnauka.by

ИЗВЕСТИЯ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ.

Серия биологических наук. 2025. Т. 70, № 1.

Выходит на русском, белорусском и английском языках

Редактор *Т. В. Смирнова*

Компьютерная верстка *И. В. Счеснюк*

Подписано в печать 16.01.2025. Выход в свет 29.01.2025. Формат 60×84¹/₈. Бумага офсетная.

Печать цифровая. Усл. печ. л. 10,23. Уч.-изд. л. 11,3. Тираж 64 экз. Заказ 6.

Цена номера: индивидуальная подписка – 14,48 руб., ведомственная подписка – 33,64 руб.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Республиканское унитарное предприятие «Издательский дом «Беларуская навука».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 1/18 от 02.08.2013. ЛП № 02330/455 от 30.12.2013. Ул. Ф. Скорины, 40, 220084, г. Минск, Республика Беларусь

© РУП «Издательский дом «Беларуская навука».

Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя біялагічных навук, 2025

PROCEEDINGS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS

BIOLOGICAL SERIES. 2025, vol. 70, no. 1

The Journal was founded in 1956 under the title
“Proceedings of the Academy of Sciences of BSSR. Biological series”,
since 1992 – “Proceedings of the Academy of Sciences of Belarus. Biological series”,
since 1998 it comes under its actual title

Issued four times a year

Founder is the National Academy of Sciences of Belarus

The Journal is registered on May 18, 2009 by the Ministry of Information of the Republic of Belarus
in the State Registry of Mass Media, reg. no. 395

*The Journal is included in the List of Journals for Publication of the results
of Dissertation Research in the Republic of Belarus and in the database
of Russian Science Citation Index (RSCI)*

Editor-in-Chief

Oleg Yu. Baranov – Department of Biological Sciences of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Republic of Belarus

Editorial Board

Alexander V. Kilchevsky (*Associate Editor-in-Chief*) – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Michail Y. Nikiforov (*Associate Editor-in-Chief*) – Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Bioresources, Minsk, Republic of Belarus

Tatsiana V. Smirnova (*Leading Editor*)

Zinaida M. Aleshchenkova – Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Vadim V. Demidchik – V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Nadezhda I. Dubovets – Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Andrei E. Hancharou – Institute of Biophysics and Cell Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Lyudmila F. Kabashnikova – Institute of Biophysics and Cell Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Emiliya I. Kolomiets – State Research and Production Association “Chemical Synthesis and Biotechnology”, Minsk, Republic of Belarus
Nikolai A. Laman – V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus
Vladimir E. Padutov – Institute of Forest of the National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Republic of Belarus
Valery N. Prokhorov – V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus
Vladimir N. Reshetnikov – Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus
Vladimir V. Titok – Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus
Vladimir I. Torchyk – Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus
Igor D. Volotovskii – Institute of Biophysics and Cell Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

E d i t o r i a l C o u n c i l

Vladimir F. Baginski – F. Skorina Gomel State University, Gomel, Republic of Belarus
Arvids Barsevskis – Daugavpils University, Daugavpils, Republic of Latvia
Yuri Yu. Dgebuadze – A. N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
Vasily E. Gayduk – A. S. Pushkin Brest State University, Brest, Republic of Belarus
Nikolay A. Kolchanov – Institute of Cytology and Genetics of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation
Vladimir V. Kuznetsov – K. A. Timiriazev Institute of Plant Physiology of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
Wanda Olech-Piasecka – Warsaw University of Life Sciences, Warsaw, Republic of Poland
Oleg N. Pugachev – Zoological Institute of the Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg, Russian Federation
Alexander I. Rapoport – Institute of Microbiology and Biotechnology of University of Latvia, Riga, Republic of Latvia
Igor A. Tikhonovich – All-Russia Research Institute for Agricultural Microbiology, Saint-Petersburg, Russian Federation

Address of the Editorial Office:

*1, Akademicheskaya Str., room 119, 220072, Minsk, Republic of Belarus.
Phone: +375 17 272-19-19; e-mail: biolvesti@mail.ru
Website: vestibio.belnauka.by*

PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS.

Biological series, 2025, vol. 70, no. 1.

Printed in Russian, Belarusian and English languages

Editor *T. V. Smirnova*

Computer imposition *I. V. Schasniuk*

Sent for press 16.01.2025. Output 29.01.2025. Format 60×84¹/₈. Offset paper.
Digital press. Printed sheets 10.23. Publisher's signatures 11.3. Circulation 64 copies. Order 6.
Number price: individual subscription – 14.48 byn., departmental subscription – 33.64 byn.

Publisher and printing execution:

Republican unitary enterprise “Publishing House “Belaruskaya Navuka”.
Certificate on the state registration of the publisher, manufacturer,
distributor of printing editions no. 1/18 dated of August 2, 2013. License for press no. 02330/455 dated of December 30, 2013.
Address: F. Skorina Str., 40, 220084, Minsk, Republic of Belarus.

© RUE “Publishing House “Belaruskaya Navuka”,
Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological series, 2025

ISSN 1029-8940 (Print)
ISSN 2524-230X (Online)

ЗМЕСТ

Рупасова Ж. А., Авраменко С. Н., Ушакова А. В., Павловский Н. Б., Дрозд О. В., Белый П. Н., Шпитальная Т. В., Вечер Н. Н. Генотипические особенности взаимосвязи компонентов антиоксидантного комплекса плодов голубики высокорослой с содержанием органических соединений при интродукции в Беларуси	7
Феськова Е. В., Леонтьев В. Н., Тарасевич А. Ю., Титок В. В. Жирнокислотный состав липидов семян базилика тонкоцветкового (<i>Ocimum tenuiflorum</i> L.) и базилика обыкновенного (<i>Ocimum basilicum</i> L.)	24
Никитин А. Н., Шуранкова О. А., Танкевич Е. А. Влияние обработки семян ярового ячменя микоризообразующими грибами рода <i>Glomus</i> на накопление ¹³⁷ Cs вегетативными органами растений	31
Волнистый А. А., Гомель К. В., Сергеев Г. В., Никифоров М. Е. Генетическая характеристика разводной группировки оленей и оценка потока генов из нее в природные популяции	40
Демянчик В. В. Пути формирования синантропного населения позвоночных <i>Tetrapoda</i> селитебных территорий в условиях юго-запада Беларуси	48
Киселева Е. П., Михайлопуло К. И., Свиридов О. В. Новая тест-система для детекции наличия сальмонелл в пищевых продуктах методом конкурентного иммуноферментного анализа	55
Кипень В. Н., Снытков Е. В., Михайлова М. Е. Установление породного состава свиней с использованием технологии KASP	69
Чайковский А. И., Кудин М. В., Груммо Д. Г., Максименков М. В., Устин В. В. К вопросу о придании природоохранного статуса Полесскому государственному радиационно-экологическому заповеднику	80

ISSN 1029-8940 (Print)
ISSN 2524-230X (Online)

CONTENTS

Rupasova Zh. A., Avramenko S. N., Ushakova A. V., Pavlovsky N. B., Drozd O. V., Bely P. N., Shpitalnaya T. V., Vecher N. N. Genotypic features of the relationship between the components of the antioxidant complex of high blueberry fruits and the content of organic compounds during introduction in Belarus.....	7
Feskova A. U., Leontiev V. N., Tarasevich A. Yu., Titok V. V. Fatty acid composition of seed lipids of holy basil (<i>Ocimum tenuiflorum</i> L.) and common basil (<i>Ocimum basilicum</i> L.).....	24
Nikitin A. N., Shurankova O. A., Tankevich E. A. Influence of spring barley seed treatment with mycorrhiza-forming fungi of the genus <i>Glomus</i> on ¹³⁷ Cs accumulation in the vegetative organs of the plants	31
Valnisty A. A., Homel K. V., Sergeev G. V., Nikiforov M. E. Genetic characteristics of the bred group of deer and assessment of gene flow from it to natural populations.....	40
Demyanchik V. V. Ways of formation of synanthropic population of <i>Tetrapoda</i> vertebrates in residential territories in the conditions of south-west Belarus	48
Kiseleva E. P., Mikhailopulo K. I., Sviridov O. V. A new test system for <i>Salmonella</i> detection in food products by competitive immunoassay	55
Kipen' V. N., Snytkov E. V., Mikhailova M. E. Establishing the breed composition of pigs using KASP technology	69
Tchaikovsky A. I., Kudin M. V., Grummo D. G., Maksimenkov M. V., Ustin V. V. On the granting nature protection status to the Polesie state radiation and ecological reserve	80

ISSN 1029-8940 (Print)

ISSN 2524-230X (Online)

УДК 634.739.3:736(476)

<https://doi.org/10.29235/1029-8940-2025-70-1-7-23>

Поступила в редакцию 14.10.2024

Received 14.10.2024

Ж. А. Рупасова¹, С. Н. Авраменко¹, А. В. Ушакова¹,
Н. Б. Павловский¹, О. В. Дрозд¹, П. Н. Белый¹, Т. В. Шпитальная¹, Н. Н. Вечер²

¹Центральный ботанический сад НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

²Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск, Республика Беларусь

ГЕНОТИПИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОСВЯЗИ КОМПОНЕНТОВ АНТИОКСИДАНТНОГО КОМПЛЕКСА ПЛОДОВ ГОЛУБИКИ ВЫСОКОРОСЛОЙ С СОДЕРЖАНИЕМ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ИНТРОДУКЦИИ В БЕЛАРУСИ

Аннотация. Приведены результаты сравнительного исследования в южной агроклиматической зоне Беларуси структуры корреляционных связей между уровнями антиоксидантной и ферментативной активности плодов, с одной стороны, и 12 показателями биохимического состава, с другой, в таксономическом ряду 6 новых интродуцируемых сортов голубики высокорослой (раннеспелых – *Chanticleer*, *Hannah's Choice*, среднеспелых – *Bluegold*, *Harrison*, позднеспелых – *Aurora*, *Rubel*) и районированных сортов, соответствующих данным группам спелости (*Weymouth*, *Bluecrop* и *Elliott*). Выявлены существенные генотипические различия в ориентации и силе этих связей, обусловленные индивидуальными особенностями биохимического состава тестируемых объектов, свидетельствующие о выраженной сортоспецифичности анализируемых признаков. Обнаружено заметное сходство у представителей разных сортовых групп спектра органических соединений, наиболее значимых для формирования антиоксидантного комплекса плодов, наиболее выразительно проявившееся у ранне- и позднеспелых сортов и заключавшееся в доминирующей роли катехинов, танинов, лейкоантоцианов и флавонолов, тогда как у среднеспелых сортов, наряду с танинами и лейкоантоцианами, также свободных органических и гидроксикоричных кислот. При этом наименьшее влияние на антирадикальные свойства плодов голубики оказывали растворимые сахара и аскорбиновая кислота.

Установлена однотипная последовательность таксонов голубики в порядке снижения уровня взаимодействия отдельных компонентов антиоксидантного комплекса плодов с содержанием органических соединений разной химической природы при наибольшем проявлении наиболее сильных прямых корреляционных связей с источниками антиоксидантной, пероксидазной и полифенолоксидазной активности у сорта *Hannah's Choice*, а с источниками каталазной и в меньшей степени пероксидазной активности – у сорта *Aurora*, на фоне минимального количества подобных взаимосвязей – у сорта *Harrison*, уступавшего в 1,6–2,1 раза по данному признаку лидирующим таксонам.

Ключевые слова: голубика высокорослая, ранне-, средне- и позднеспелые сорта, плоды, антиоксидантная и ферментативная активность, биохимический состав, структура корреляционных связей

Для цитирования: Генотипические особенности взаимосвязи компонентов антиоксидантного комплекса плодов голубики высокорослой с содержанием органических соединений при интродукции в Беларуси / Ж. А. Рупасова, С. Н. Авраменко, А. В. Ушакова [и др.] // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя біялагічных навук. – 2025. – Т. 70, № 1. – С. 7–23. <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2025-70-1-7-23>

Zhanna A. Rupasova¹, Stanislav N. Avramenko¹, Anna V. Ushakova¹, Nikolay B. Pavlovsky¹, Olga V. Drozd¹,
Pavel N. Bely¹, Tamara V. Shpitalnaya¹, Nikolay N. Vecher²

¹Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

²Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Republic of Belarus

GENOTYPIC FEATURES OF THE RELATIONSHIP BETWEEN THE COMPONENTS OF THE ANTIOXIDANT COMPLEX OF HIGH BLUEBERRY FRUITS AND THE CONTENT OF ORGANIC COMPOUNDS DURING INTRODUCTION IN BELARUS

Abstract. The article presents the results of a comparative study in the southern agroclimatic zone of Belarus in the taxonomic series of 6 new introduced varieties of highbush blueberry: early ripening – *Chanticleer*, *Hannah's Choice*, mid-season – *Bluegold*, *Harrison*, and late ripening – *Aurora*, *Rubel*, as well as the corresponding to these maturity groups zoned varieties *Weymouth*, *Bluecrop* and *Elliott* structures of correlation links between the levels of antioxidant and enzymatic activity, on the one hand, and 12 indicators of biochemical composition, on the other.

Significant genotypic differences in the orientation and strength of these links were revealed due to the individual characteristics of the biochemical composition of the tested objects, indicating a pronounced variety specificity of the analyzed traits.

A noticeable similarity was revealed in the representatives of different varietal groups in the spectra of organic compounds most significant for formation of the antioxidant complex of fruits, which was most clearly manifested in early and late ripening varieties and consisted of the dominant role of catechins, tannins, leucoanthocyanins and flavonols, and in mid-ripening varieties – along with tannins and leucoanthocyanins, also free organic and hydroxycinnamic acids.

At the same time, soluble sugars and ascorbic acid had the least effect on the antiradical properties of blueberry fruits. A uniform sequence of blueberry taxa was established in the order of decreasing the interaction level of individual components of the antioxidant complex of fruits with the content of organic compounds of different chemical nature with the greatest manifestation of the strongest direct correlation links with sources of antioxidant, peroxidase and polyphenoloxidase activity in the Hannah's Choice variety, and in the Aurora variety – with sources of catalase and, to a lesser extent, the peroxidase activity against the background of a minimum number of such interactions in the Harrison variety, which was 1.6–2.1 times inferior in this feature to the leading blueberry taxa.

Keywords: high blueberry early, mid- and late-ripening varieties, fruits, antioxidant and enzymatic activity, biochemical composition, structure of correlation links

For citation: Rupasova Zh. A., Avramenko S. N., Ushakova A. V., Pavlovsky N. B., Drozd O. V., Bely P. N., Shpitalnaya T. V., Veher N. N. Genotypic features of the relationship between the components of the antioxidant complex of high blueberry fruits and the content of organic compounds during introduction in Belarus. *Vesti Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya biyalagichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological series*, 2025, vol. 70, no. 1, pp. 7–23 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2025-70-1-7-23>

Введение. В связи с проведением комплексной оценки процесса адаптации к почвенно-климатическим условиям южной агроклиматической зоны республики 6 новых интродуцируемых сортов голубики высокорослой (раннеспелых – *Chanticleer*, *Hannah's Choice*, среднеспелых – *Bluegold*, *Harrison* и позднеспелых – *Aurora*, *Rubel*), пополнивших коллекционный фонд Центрального ботанического сада НАН Беларуси, осуществлено исследование биохимического состава и уровня антиоксидантной и ферментативной активности их плодов в сравнении с принятыми в качестве эталонов соответствующими их группам спелости районированными сортами *Weymouth*, *Bluecrop* и *Elliott*. В результате выявлена существенная зависимость биохимического состава, а также антиоксидантной и ферментативной активности ягодной продукции тестируемых таксонов от генотипа растений [1]. При этом было показано, что тестируемые раннеспелые сорта в 1,7–2 раза уступали сорту *Weymouth* по интегральному уровню питательной и витаминной ценности плодов по совокупности 14 показателей, а среднеспелые – превосходили в этом плане эталонный сорт *Bluecrop* в 2,3 и 8 раз при наибольших различиях у сорта *Bluegold*, превосходившего сорт *Harrison* по качественному составу плодов в 3,5 раза. Вместе с тем позднеспелый сорт *Aurora* в 2,5 раза отставал от районированного сорта *Elliott* по данному признаку, а сорт *Rubel*, напротив, превосходил его в этом отношении в 4,5 раза. В соответствующих таксономических группах обосновано лидирующее положение сортов *Weymouth*, *Bluegold* и *Rubel* по качественному составу плодов.

На основании данных исследований установлено, что наиболее высокой антиоксидантной и ферментативной активностью плодов характеризовались позднеспелые сорта голубики *Elliott* и особенно *Rubel*, тогда как наименьшей – среднеспелый сорт *Bluecrop*. При этом выявлено отставание обоих тестируемых раннеспелых сортов и позднеспелого *Aurora* от соответствующих районированных сортов по антиоксидантной, каталазной, пероксидазной и полифенолоксидазной активности плодов и превышение их эталонных значений у обоих тестируемых среднеспелых сортов и позднеспелого сорта *Rubel*. Наряду с этим было обнаружено полное совпадение сортовых рядов голубики по изменению уровня антиоксидантной и ферментативной активности плодов, а также интегрального уровня их питательной и витаминной ценности по совокупности 14 биохимических характеристик. Данное обстоятельство косвенно указывало на высокую корреляционную связь антиоксидантных свойств плодов с высоким содержанием в них биологически активных соединений разной химической природы.

На наш взгляд, отмеченное совпадение обозначенных сортовых рядов обусловлено значительным сходством у исследуемых таксонов голубики содержания в плодах широкого спектра органических соединений, в том числе витаминов С и Р, обладающих высоким уровнем антирадикальной и ферментативной активности, а выявленные различия могли быть обусловлены

генотипическими особенностями обеспечения антиоксидантных свойств за счет иных органических соединений, не охваченных настоящими исследованиями. Ведь общеизвестно, что в биологических системах в качестве антиоксидантов (наряду с биофлавоноидами, обладающими данными свойствами) могут выступать соединения разной химической природы, способные ингибировать процессы свободнорадикального окисления, в том числе каротиноиды, белки, органические кислоты и даже растворимые сахара и пектиновые вещества [2–4].

В связи с этим особый научный интерес представляло выявление в плодах голубики основных источников антирадикальной и ферментативной активности в зависимости от генотипа растений. С этой целью в 2023–2024 гг. для ранне-, средне- и позднеспелых сортов были определены значения коэффициентов парной корреляции между антиоксидантной активностью (АОА) и активностью окислительно-восстановительных ферментов, с одной стороны, и содержанием органических соединений, являющихся, предположительно, источниками данной активности, с другой.

Материалы и методы исследования. Объектами исследований являлись плоды 6 новых интродуцируемых сортов голубики высокорослой (раннеспелых – *Chanticleer*, *Hannah's Choice*, среднеспелых – *Bluegold*, *Harrison* и позднеспелых – *Aurora*, *Rubel*), а также соответствующих данным группам спелости районированных сортов *Weymouth*, *Bluecrop* и *Elliott*. В период созревания плодов опытных растений с использованием общепринятых методов биохимического анализа растительных объектов [5–12] в них определяли содержание сухих веществ, свободных органических, аскорбиновой и гидроксикоричных кислот (в пересчете на хлорогеновую), растворимых сахаров, пектиновых веществ, собственно антоцианов и суммарное количество антоциановых пигментов, катехинов, флавонолов (в пересчете на рутин) и дубильных веществ (танинов). АОА этанольных экстрактов из свежих плодов определяли с использованием 2,2-дифенил-1-пикрилгидразила [3, 13], активность пероксидазы (ПО) – по методу А. Н. Бояркина [14]; полифенолоксидазы (ПФО) – с пирокатехином [15]; каталазы (КАТ) – по методу А. Н. Баха и А. И. Опарина [16].

Все аналитические определения выполнены в 3-кратной биологической повторности. Данные статистически обработаны с использованием программы Excel [17].

Результаты и их обсуждение. С целью выявления компонентов биохимического состава плодов сортов голубики, обеспечивающих наиболее высокий уровень их антиоксидантной и ферментативной активности, при анализе структуры корреляционных связей, представленных в табл. 1, мы ориентировались главным образом на наиболее тесные из них, определяемые абсолютными значениями коэффициентов парной корреляции $r > 0,70$. При оценке прямых взаимодействий обозначенных признаков принимали во внимание также наличие связей, обладающих средней силой (0,50–0,69).

Как следует из табл. 2, из 432 статистических связей между 12 биохимическими характеристиками плодов 9 модельных сортов голубики высокорослой, с одной стороны, и уровнями АОА и активности исследуемых окислительно-восстановительных ферментов (КАТ, ПО и ПФО), с другой, на долю наиболее сильных положительных связей приходилось 188, или 43,5 % от их общего количества, а на долю прямых связей средней силы – 53, или 12,3 %, тогда как на долю сильных отрицательных связей – лишь 42, или 9,7 %. Обращает на себя внимание существенно большее количество прямых тесных взаимодействий между обозначенными признаками у растений голубики, нежели у таковых жимолости синей [18], свидетельствовавшее в первом случае о более широком спектре источников данной активности среди исследуемых компонентов биохимического состава плодов. При этом в общем сортовом ряду голубики суммарное количество сильных положительных связей, выявленных у АОА и ферментов окислительно-восстановительного цикла, варьировалось в сравнительно узком интервале – от 44 у активности ПФО до 49 у АОА и активности КАТ при изменении числа связей средней силы от 11 у показателей активности всех исследуемых ферментов до 20 у АОА. Остальная часть выявленных корреляционных связей обладала умеренной (0,30–0,49), слабой (0,20–0,29) и очень слабой (менее 0,19) силой. Что касается наиболее выразительных обратных связей, то их максимальное количество (по 13) выявлено у АОА и активности КАТ, а минимальное (4) – у активности ПО.

Таблица 1. Коэффициенты парной корреляции (Rx, y) между биохимическими характеристиками плодов сортов голубики высокорослой и уровнем их антиоксидантной и ферментативной активности
 Table 1. The coefficients of paired correlation (Rx, y) between the biochemical characteristics of fruits of tall blueberry varieties and the level of their antioxidant and enzymatic activity

Сорт	Свободные органические кислоты	Аскорбиновая кислота	Гидроксикоричные кислоты	Пектиновые вещества	Растворимые сахара	Дубильные вещества	Собственно антоцианы	Лейкоантоцианы	Сумма антоциановых пигментов	Катехины	Флавонолы	Сумма биофлавоноидов
АОА												
<i>Weymouth</i>	-0,23	-0,82	0,66	0,23	0,66	0,70	0,66	0,80	0,55	0,70	0,99	0,66
<i>Chanticleer</i>	-0,95	0,63	0,66	-0,23	0,70	0,99	0,80	0,80	0,90	0,80	-0,70	0,88
<i>Hannah's Choice</i>	0,70	0,90	0,99	-0,40	0,99	0,70	0,80	0,88	0,99	0,99	-0,74	-0,99
<i>Bluecrop</i>	0,23	-0,84	0,99	-0,40	-0,66	0,99	0,90	0,90	0,99	0,80	0,23	0,23
<i>Bluegold</i>	0,99	0,84	0,99	0,23	0,70	0,99	0,99	0,23	0,80	-0,90	0,30	0,10
<i>Harrison</i>	0,96	-0,58	0,66	0,66	0,66	0,99	0,60	0,90	0,60	-0,80	0,23	0,69
<i>Elliott</i>	0,96	0,54	0,53	0,40	-0,99	0,80	0,23	0,90	-0,23	-0,90	0,99	0,80
<i>Aurora</i>	0,99	-0,99	0,23	-0,23	-0,99	0,99	0,60	0,88	0,60	0,90	0,78	-0,99
<i>Rubel</i>	-0,23	-0,65	0,66	-0,30	0,23	0,70	0,66	0,74	-0,66	0,80	0,66	0,45
Активность КАТ												
<i>Weymouth</i>	0,23	0,10	0,30	0,99	-0,66	0,99	0,23	0,33	0,99	0,99	-0,99	0,33
<i>Chanticleer</i>	-0,23	-0,99	0,30	-0,88	0,23	-0,99	-0,99	-0,80	0,99	0,70	0,86	-0,23
<i>Hannah's Choice</i>	0,99	-0,88	-0,23	-0,23	-0,66	-0,80	0,99	0,60	0,80	-0,23	0,80	0,70
<i>Bluecrop</i>	0,80	-0,70	0,99	0,23	0,40	0,80	0,70	0,66	-0,50	0,50	0,70	0,66
<i>Bluegold</i>	0,90	0,66	0,99	0,66	0,23	-0,80	0,66	0,70	0,66	0,23	0,23	0,50
<i>Harrison</i>	0,23	-0,66	0,88	0,78	0,23	0,80	-0,45	0,88	0,70	0,66	0,44	0,44
<i>Elliott</i>	0,74	-0,23	0,74	-0,88	0,70	0,80	-0,23	0,90	0,88	0,74	-0,50	0,66
<i>Aurora</i>	0,88	0,99	-0,66	0,99	-0,99	0,74	0,88	0,90	0,90	0,90	0,23	0,80
<i>Rubel</i>	0,23	0,99	0,23	0,99	-0,99	0,80	0,99	0,99	-0,23	0,90	0,99	0,99
Активность ПО												
<i>Weymouth</i>	0,33	0,99	0,23	0,99	0,33	0,23	0,99	0,99	-0,60	0,99	0,30	0,23
<i>Chanticleer</i>	0,44	0,80	0,40	0,71	0,66	0,50	-0,99	-0,23	0,66	0,99	0,99	0,74
<i>Hannah's Choice</i>	0,60	0,60	0,90	0,70	0,99	0,50	0,90	0,99	0,66	0,99	0,90	0,88
<i>Bluecrop</i>	0,99	-0,99	-0,50	0,99	-0,66	-0,60	-0,80	0,10	0,66	0,90	0,23	0,70
<i>Bluegold</i>	0,80	-0,60	0,40	0,23	-0,50	0,99	0,23	0,23	0,88	0,23	-0,50	-0,66
<i>Harrison</i>	0,30	-0,33	0,44	0,74	-0,23	0,80	-0,40	0,50	0,99	-0,50	-0,45	0,80

Показатели	Активность ПФО										
	АОА	Активность КАТ		Активность ПО		Активность ПФО		Активность КАТ		АОА	
	положительная	отрицательная	положительная	отрицательная	положительная	отрицательная	положительная	отрицательная	положительная	отрицательная	
<i>Elliott</i>	0,66	-0,23	0,99	-0,10	0,88	0,40	-0,23	-0,60	0,80	-0,40	0,99
<i>Aurora</i>	0,66	-0,33	0,88	0,70	0,99	0,10	-0,40	0,88	0,80	0,23	0,99
<i>Rubel</i>	-0,23	-0,99	0,78	0,71	0,70	0,99	-0,40	0,80	0,74	0,70	0,40
<i>Weymouth</i>	0,99	-0,80	0,74	0,55	0,74	0,50	0,10	0,50	0,88	0,50	0,23
<i>Chanticleer</i>	0,80	0,23	0,66	-0,23	0,98	0,23	0,23	0,88	0,10	0,74	-0,50
<i>Hannah's Choice</i>	0,45	-0,60	0,98	0,88	0,99	0,99	0,90	0,99	0,74	-0,23	0,99
<i>Bluescrop</i>	-0,23	0,60	0,80	0,99	0,10	-0,23	0,88	0,99	0,74	-0,50	0,88
<i>Bluesgold</i>	-0,20	-0,50	0,88	0,45	0,23	0,74	0,88	0,99	0,66	-0,88	0,88
<i>Harrison</i>	0,10	-0,80	0,70	-0,74	0,23	0,55	0,80	-0,50	-0,80	-0,99	0,88
<i>Elliott</i>	0,25	0,99	0,78	0,23	0,50	0,60	0,99	-0,74	0,88	0,88	0,23
<i>Aurora</i>	0,99	-0,50	0,50	-0,74	-0,80	0,80	-0,50	-0,23	0,75	0,88	0,45
<i>Rubel</i>	-0,10	0,23	0,10	0,55	-0,90	0,90	0,23	0,10	0,45	0,10	0,74

Таблица 2. Количество проявлений наиболее тесной корреляционной связи ($r > 0,70$) между биохимическими характеристиками плодов и уровнем их антиоксидантной и ферментативной активности в сортовых рядах голубики высокорослой разных сроков созревания

Table 2. The number of manifestations of the closest correlation ($r > 0,70$) between the biochemical characteristics of fruits and the level of their antioxidant and enzymatic activity in the varietal rows of tall blueberries of different maturation periods

Показатели	АОА		Активность КАТ		Активность ПО		Активность ПФО		Суммарное количество проявлений связи		
	положительная	отрицательная	положительная	отрицательная	положительная	отрицательная	положительная	отрицательная	положительная	отрицательная	
Раннеспелые сорта											
Свободные органические кислоты	1	1	1	0	0	0	0	0	2	4	1
Аскорбиновая кислота	1	1	0	2	2	0	0	1	0	3	4
Гидроксикоричные кислоты	1	0	0	0	1	0	0	0	3	5	0
Пектиновые вещества	0	0	1	1	3	0	0	0	2	6	1
Растворимые сахара	2	0	0	0	1	0	0	0	1	4	0
Дубильные вещества	3	0	1	2	0	0	0	0	3	7	2
Собственно антоцианы	2	0	1	1	2	1	1	0	1	6	2
Лейкоантоцианы	3	0	0	1	2	0	0	0	1	6	1
Сумма антоциановых пигментов	2	0	3	0	0	0	0	0	2	7	0
Катехины	3	0	2	0	3	0	0	0	2	10	0
Флавонолы	1	2	2	1	2	0	0	0	1	6	3
Сумма биофлавоноидов	1	1	1	0	2	0	0	0	1	5	1
Суммарное количество связей	20/7*	5	12/1	8	18/7	1	1	19/5	1	69/20	15
Среднеспелые сорта											
Свободные органические кислоты	2	0	2	0	2	0	0	0	0	6	0

Окончание табл. 2

Показатели	АОА		Активность КАТ		Активность ПО		Активность ПФО		Суммарное количество проявлений связей	
	положительная	отрицательная	положительная	отрицательная	положительная	отрицательная	положительная	отрицательная	положительная	отрицательная
Аскорбиновая кислота	1	1	0	1	0	1	0	1	1	4
Гидроксикоричные кислоты	2	0	3	0	0	0	3	0	8	0
Пектиновые вещества	0	0	1	0	2	0	1	1	4	1
Растворимые сахара	1	0	0	0	0	0	1	1	2	1
Дубильные вещества	3	0	2	1	2	0	0	0	7	1
Собственно антоцианы	2	0	1	0	0	1	1	0	4	1
Лейкоантоцианы	2	0	2	0	0	0	3	0	7	0
Сумма антоциановых пигментов	2	0	1	0	2	0	2	0	7	0
Катехины	1	2	0	0	1	0	1	1	3	3
Флавонолы	0	0	1	0	0	0	0	2	1	2
Сумма биофлавоноидов	0	0	0	0	2	0	3	0	5	0
Суммарное количество связей	16/6	3	13/9	2	11/2	2	15/4	6	55/21	13
Позднеспелые сорта										
Свободные органические кислоты	2	0	2	0	0	0	1	0	5	0
Аскорбиновая кислота	0	1	2	0	0	1	1	0	3	2
Гидроксикоричные кислоты	0	0	1	0	0	0	1	0	2	0
Пектиновые вещества	0	0	2	1	3	0	0	0	5	1
Растворимые сахара	0	2	1	2	2	0	0	1	3	5
Дубильные вещества	3	0	3	0	3	0	0	2	9	2
Собственно антоцианы	0	0	2	0	1	0	2	0	5	0
Лейкоантоцианы	3	0	3	0	0	0	1	0	7	0
Сумма антоциановых пигментов	0	0	2	0	2	0	0	1	4	1
Катехины	2	1	3	0	3	0	1	1	9	2
Флавонолы	2	0	1	0	1	0	2	0	6	0
Сумма биофлавоноидов	1	1	2	0	2	0	1	0	6	1
Суммарное количество связей*	13/7	5	24/1	3	17/2	1	10/2	5	64/12	14
Суммарное количество связей в общем сортовом ряду	49/20	13	49/11	13	46/11	4	44/11	12	188/53	42

Примечание. * – перед чертой указано количество наиболее тесных связей, после черты – количество связей средней силы.

Вместе с тем у представителей разных сортовых групп голубики выявлены заметные различия в количестве наиболее сильных положительных связей между активностью исследуемых компонентов антиоксидантного комплекса и содержанием в плодах органических соединений, что однозначно свидетельствовало о влиянии сроков их созревания на уровень взаимодействия данных элементов метаболической системы растений.

Так, у показателя АОА, при сходном у всех сортовых групп количестве прямых корреляционных связей средней силы, наибольшим числом наиболее сильных характеризовались раннеспелые сорта голубики, тогда как наименьшим – позднеспелые при промежуточном положении среднеспелых сортов (см. табл. 2). Аналогичный характер различий между сортовыми группами голубики установлен и для активности ПФО. При этом для активности КАТ показана противоположная картина: максимальное количество прямых сильных связей у позднеспелых сортов и минимальное – у раннеспелых. Несмотря на близкое к минимальному количество подобных связей у среднеспелых сортов, выявленное у них значительное количество прямых связей средней силы (9) позволило отнести последние к объектам со сравнительно высоким уровнем взаимодействия активности КАТ с компонентами биохимического состава плодов, сопоставимым с соответствующим уровнем у позднеспелых сортов. Что касается различий между сортовыми группами голубики по степени выразительности подобных взаимосвязей у активности ПО, то наибольшей она была у раннеспелых сортов, отмеченных также максимальным для данного фермента количеством связей средней силы, а наименьшей – у среднеспелых сортов.

Как видим, у раннеспелых сортов голубики, характеризовавшихся наиболее высоким уровнем взаимосвязи уровня АОА плодов с содержанием действующих веществ, он был обусловлен органическими соединениями, являющимися источниками преимущественно пероксидазной и полифенолоксидазной активности, тогда как у позднеспелых сортов, обладавших наименьшим уровнем этого взаимодействия, основную роль в его обеспечении играли соединения, активизировавшие главным образом работу КАТ и ПО. При этом у среднеспелых сортов, занимавших промежуточное положение между ранне- и позднеспелыми сортами, приоритетную роль в формировании антиоксидантной активности играли органические соединения, выступавшие в качестве источников каталазной и полифенолоксидазной активности. Показанные индивидуальные особенности взаимодействия компонентов антиоксидантного комплекса плодов ранне-, средне- и позднеспелых сортов голубики с содержанием органических соединений разной химической природы нашли отражение в соответствующих различиях между сортовыми группами по общему количеству наиболее значимых (сильных и средних) положительных связей при лидирующем положении раннеспелых сортов (см. табл. 2).

Сопоставление в сортовых рядах голубики количества наиболее интересующих нас самых тесных положительных связей между анализируемыми характеристиками антиоксидантного комплекса и показателями биохимического состава плодов выявило заметные генотипические различия, что свидетельствовало об их выраженной сортоспецифичности, обусловленной индивидуальными особенностями качественного состава ягодной продукции (табл. 3). Так, в группе раннеспелых сортов лидирующее положение по общему количеству прямых наиболее сильных связей принадлежало сорту *Hannah's Choice*, среди среднеспелых – сорту *Bluecrop*, а среди позднеспелых сортов – сорту *Aurora*. При этом максимальное количество самых тесных положительных связей комплекса биохимических характеристик с уровнем АОА (7–9) выявлено у сортов *Chanticleer*, *Bluegold* и *Hannah's Choice*, а минимальное (3) – у сортов *Harrison* и *Rubel*. Максимальным количеством сильных связей с уровнем активности КАТ (7–9) характеризовались сорта *Elliott* и *Aurora*, а минимальным (3) – сорта *Chanticleer* и *Bluegold*. Наибольшим количеством сильных связей с уровнем активности ПО (7–8) отмечены сорта *Hannah's Choice* и *Rubel*, а наименьшим (3), как и в предыдущем случае, – сорт *Bluegold*.

Вместе с тем наименьшее количество тесных связей с активностью ПФО, как и с уровнем АОА, выявлено у сортов *Harrison* и *Rubel*. Несмотря на высокое содержание в плодах голубики биофлавоноидов, в том числе антоциановых пигментов, в метаболизме которых данный фермент играет ключевую роль [19–23], общее количество прямых сильных связей комплекса органических соединений с уровнем активности ПФО было сопоставимо с установленным для АОА,

КАТ и ПО, а у позднеспелых сортов даже уступало ему. Заметим, что общее количество тесных отрицательных связей у антиоксидантного комплекса плодов голубики, как и у его отдельных компонентов, со спектром биохимических показателей оказалось в несколько раз меньше, чем положительных, особенно у сортов *Aurora* и *Chanticleer*.

Таблица 3. Количество наиболее тесных корреляционных связей ($r > 0,70$) комплекса биохимических характеристик плодов отдельных сортов голубики высокорослой с уровнем их антиоксидантной и ферментативной активности

Table 3. The number of the closest correlations ($r > 0.70$) of the complex of biochemical characteristics of fruits of individual varieties of tall blueberries with the level of their antioxidant and enzymatic activity

Сорт	АОА		Активность КАТ		Активность ПО		Активность ПФО		Суммарное количество связей	
	положительная	отрицательная	положительная	отрицательная	положительная	отрицательная	положительная	отрицательная	положительная	отрицательная
<i>Weymouth (st)</i>	4	1	4	1	5	0	5	1	18	3
<i>Chanticleer</i>	7	2	3	5	5	1	5	0	20	8
<i>Hannah's Choice</i>	9	2	5	2	8	0	9	0	31	4
<i>Bluecrop (st)</i>	6	1	5	1	4	2	6	1	21	5
<i>Bluegold</i>	7	1	3	0	3	0	6	1	19	2
<i>Harrison</i>	3	1	5	0	4	0	3	4	15	5
<i>Elliott (st)</i>	5	2	7	1	4	0	4	2	20	5
<i>Aurora</i>	5	3	9	1	6	0	4	2	24	6
<i>Rubel</i>	3	0	8	1	7	1	2	1	20	3

Выявленные сортовые различия в степени проявления взаимосвязи уровня АОА и активности окислительно-восстановительных ферментов с совокупностью биохимических характеристик плодов голубики в значительной мере обусловлены индивидуальным вкладом отдельных органических соединений в обеспечение данной активности. Анализируя табл. 2, можем убедиться, что в общем сортовом ряду растений данного вида количество установленных у каждого предполагаемого ее источника самых сильных связей с исследуемыми компонентами антиокислительной системы варьировалось от 0 до 3. При этом, независимо от сроков созревания плодов, наибольшим для АОА оно было у танинов, что наблюдалось и у растений жимолости синей [18], а у ранне- и позднеспелых сортов голубики – также у лейкоантоцианов, а с учетом прямых связей средней силы – и у других компонентов Р-витаминного комплекса, а также у гидроксикоричных кислот.

Наиболее активным участием в обеспечении каталазной активности плодов голубики (особенно у позднеспелых сортов) характеризовались антоциановые пигменты, а также гидроксикоричные кислоты и танины, тогда как для активности пероксидазы наиболее выраженная взаимосвязь (особенно у ранне- и позднеспелых сортов) установлена с содержанием катехинов, пектиновых и дубильных веществ. Что касается полифенолоксидазной активности, то для нее показано наиболее сильное проявление зависимости (особенно у ранне- и среднеспелых сортов) от содержания гидроксикоричных кислот, а также от такового танинов (у раннеспелых сортов) и лейкоантоцианов (у среднеспелых). Наименьшее количество самых тесных связей между исследуемыми признаками выявлено у позднеспелых сортов голубики. В ряде случаев установлено заметное участие в формировании антиоксидантного комплекса плодов голубики не только пектиновых веществ, но и растворимых сахаров, а также аскорбиновой и титруемых кислот, что мы, кстати, наблюдали и в плодах жимолости синей [18] и что подтверждалось проявлением не только тесных положительных связей, но и связей средней силы (см. табл. 2).

На основании суммирования числа индивидуальных для каждого биохимического показателя тесных положительных связей с обозначенными компонентами антиоксидантного комплекса плодов голубики выявлены действующие вещества, в наибольшей степени обеспечивавшие работу их антиокислительной системы. Так, у раннеспелых сортов суммарное количество подобных связей в спектре органических соединений варьировалось от 3 до 10 при наибольших значениях у танинов, антоциановых пигментов и особенно у катехинов. У среднеспелых сортов голубики при диапазоне варьирования данного признака от 1 до 8 приоритетную роль в обеспечении антиокси-

дантных свойств плодов играли антоциановые пигменты, танины и особенно гидроксикоричные кислоты. У позднеспелых сортов при изменении суммарного количества прямых тесных связей между исследуемыми показателями от 2 до 9 основными источниками антирадикальной активности плодов следовало признать лейкоантоцианы, но в наибольшей степени – танины и катехины.

Нетрудно убедиться, что, независимо от сортовой принадлежности растений голубики, наиболее высокий уровень антиоксидантной и ферментативной активности плодов был обусловлен антоциановыми пигментами, танинами и катехинами, а в отдельных случаях – и гидроксикоричными кислотами, что наблюдалось и в аналогичных исследованиях с растениями жимолости синей [18]. Подобные результаты получены нами ранее при оценке влияния способа размножения голубики высокорослой на биохимический состав плодов [24]. Наряду с этим выявлены органические соединения с наименьшим суммарным количеством сильных положительных связей с компонентами антиоксидантного комплекса, указывавшие на их второстепенную роль в его формировании. Так, независимо от сортовой принадлежности растений, к таковым следовало отнести аскорбиновую кислоту и в меньшей степени – растворимые сахара.

Как видим, большинство исследуемых органических соединений принимало выраженное в разной степени участие в обеспечении антирадикальных свойств плодов голубики, что согласуется с результатами исследований данной способности у биофлавоноидов [19–21, 23, 25], свободных органических, аскорбиновой и гидроксикоричных кислот [26, 27], а также пектинов [4], танинов [20, 28] и даже растворимых сахаров [29]. Вместе с тем, несмотря на индивидуальный характер проявления наиболее тесных прямых связей между анализируемыми признаками, свидетельствующий об их выраженной сортоспецифичности, в общем таксономическом ряду лишь в единичных случаях наличие подобных связей выявлено у отдельных таксонов голубики (см. табл. 1). Так, для уровня активности КАТ только у позднеспелого сорта *Elliott* установлена весьма тесная положительная связь с содержанием растворимых сахаров, для уровня активности ПО – у раннеспелого сорта *Hannah's Choice* с содержанием гидроксикоричных кислот, а для уровня активности ПФО – у сорта *Elliott* с содержанием аскорбиновой кислоты. Для остальных же показателей биохимического состава плодов установлено совпадение тесного прямого взаимодействия между уровнем антиоксидантной и ферментативной активности, с одной стороны, а с другой – с содержанием в них органических соединений разной химической природы одновременно у нескольких или у всех таксонов голубики.

Заметим, что в общем сортовом ряду количество сильных положительных связей для уровня АОА варьировалось от 2 до 9, но наибольшим оно было с содержанием в плодах лейкоантоцианов и особенно танинов, а наименьшим – с содержанием аскорбиновой кислоты и общим количеством биофлавоноидов (см. табл. 1). Напомним, что в аналогичных исследованиях с растениями жимолости синей наблюдалась похожая картина [18], но приоритетная роль в обеспечении АОА ее плодов, наряду с танинами, принадлежала собственно антоцианам. Вместе с тем в обеспечении антирадикальных свойств плодов голубики проявились заметные генотипические различия по спектру органических соединений, являющихся источниками антиоксидантной активности. Так, у раннеспелых сортов приоритетная роль при этом принадлежала обеим группам антоциановых пигментов, катехинам, танинам и растворимым сахарам, у среднеспелых – не только обеим группам антоциановых пигментов и танинам, но и свободным органическим и гидроксикоричным кислотам, а у позднеспелых сортов – лейкоантоцианам, катехинам, флавонолам, титруемым кислотам и, как и в двух предыдущих случаях, танинам. Как видим, независимо от сроков созревания плодов голубики высокорослой, основными источниками их антиоксидантной активности являлись танины и биофлавоноиды, особенно антоциановые пигменты.

Исследование в таксономическом ряду голубики структуры корреляционных связей между активностью ферментов окислительно-восстановительного цикла и содержанием в плодах органических соединений, как и для уровня АОА, показало заметные генотипические различия в ориентации и силе этих связей, обусловленные индивидуальными особенностями биохимического состава плодов опытных растений, что свидетельствовало о выраженной сортоспецифичности анализируемых признаков. Вместе с тем сила и направленность выявленных взаимодействий в значительной степени определялись природой и функциональной ролью самих

ферментов. Тем не менее для активности каждого из них, как и для АОА, в большинстве случаев обнаружено совпадение наиболее тесных прямых связей с содержанием действующих веществ одновременно у нескольких таксонов голубики (см. табл. 1).

Так, в общем сортовом ряду количество сильных положительных связей у уровня активности КАТ варьировалось от 1 до 6, но наибольшим оно было (как и у АОА) с содержанием в плодах антоциановых пигментов, главным образом лейкоантоцианов и особенно танинов, а наименьшим (по 1–2 связи) – с содержанием аскорбиновой кислоты и растворимых сахаров. При этом выявлены заметные генотипические различия не только по спектру органических соединений, являвшихся основными источниками каталазной активности, но и по количеству наиболее сильных прямых связей, максимальному у позднеспелых сортов голубики. Заметим, что у раннеспелых сортов приоритетная роль в обеспечении работы данного фермента принадлежала антоциановым пигментам, катехинам и флавонолам, у среднеспелых – танинам, свободным органическим и гидроксикоричным кислотам, а у позднеспелых сортов – аскорбиновой и свободным органическим кислотам, пектиновым веществам и танинам, обеим группам антоциановых пигментов и катехинам. Нетрудно убедиться не только в заметном изменении, но и в расширении спектра действующих веществ, участвующих в функционировании каталазы, в ряду от раннеспелых к позднеспелым сортам, что согласуется с выявленным нами в этих исследованиях существенным увеличением в этом ряду содержания в плодах основных групп биофлавоноидов, а на участие каталазы в фенольном метаболизме есть указание в работе М. Kofroňová с соавт. [29]. В свою очередь, это косвенно свидетельствовало о соответствующем усилении в данном направлении антиоксидантных свойств плодов голубики.

На основании аналогичных исследований с ферментом ПО, как и в предыдущем случае, установлено наличие тесных прямых корреляционных связей ее активности со всеми исследуемыми соединениями, количество которых в общем таксономическом ряду варьировалось от 1 до 8 (см. табл. 1). При этом наибольшим оно было с содержанием катехинов и пектиновых веществ, а наименьшим – с таковым свободных органических, аскорбиновой и гидроксикоричных кислот, а также лейкоантоцианов (по 1–2 связи). Нетрудно убедиться в заметном ослаблении роли антоциановых пигментов в функционировании данного фермента по сравнению с АОА и активностью КАТ на фоне усиления взаимодействия с пектиновыми веществами. Вместе с тем наименьшим количеством наиболее сильных положительных связей между активностью ПО и содержанием действующих веществ характеризовались представители среднеспелых сортов голубики, а наибольшим – раннеспелый сорт *Hannah's Choice* и позднеспелые *Rubel* и *Aurora*, первый из которых отмечен также максимальным числом аналогичных связей у антиоксидантной, а оба вторых – у каталазной активности.

Но, как и в предыдущих случаях, у представителей исследуемых сортовых групп голубики выявлены заметные различия в спектрах органических соединений, выступавших в качестве основных источников пероксидазной активности плодов. Как следует из табл. 1, только у раннеспелых сортов обнаружено доминирование ее сильной взаимосвязи с содержанием аскорбиновой кислоты, собственно антоцианов, лейкоантоцианов и флавонолов на фоне преобладания у всех сортовых групп прямой тесной связи с содержанием пектиновых веществ, катехинов и общим количеством биофлавоноидов. Это согласуется с распространенным мнением о возможности участия ПО (наряду с ПФО) в реакциях фенольного метаболизма [19, 23, 29]. Индивидуальной особенностью среднеспелых сортов голубики явилось наличие сильной положительной связи между активностью ПО и содержанием свободных органических кислот на фоне отчетливо выраженного сходства с позднеспелыми сортами в существовании подобной связи с содержанием танинов и антоциановых пигментов.

Анализ структуры корреляционных связей между уровнем активности ПФО и содержанием органических соединений в плодах исследуемых сортов голубики, как и во всех предыдущих случаях, выявил в ней как существенные генотипические различия, так и значительное количество совпадений в их проявлении в основном у раннеспелых и среднеспелых сортов. Поскольку данная оксидаза является основным ферментом фенольного метаболизма, то для уровня ее активности следовало ожидать более выраженного, чем у КАТ и ПО, взаимодействия с соединениями фенольной природы, которыми чрезвычайно богаты плоды голубики. Однако это предполо-

жение лишь отчасти подтверждают данные табл. 1, показавшие в ряду наиболее тесных прямых корреляционных связей между уровнем ПФО и содержанием в плодах органических соединений разной химической природы, количество которых варьировалось от 1 до 7, наличие сходного и даже уступавшего выявленному у активности КАТ и ПО числа ее сильных взаимодействий с основными компонентами биофлавоноидного комплекса. Вместе с тем наибольшим участием в обеспечении полифенолоксидазной активности в плодах голубики характеризовались гидроксикоричные кислоты, относящиеся к соединениям C₆-C₃-ряда [23], что подтверждалось максимальным количеством тесных прямых связей уровня ПФО с их содержанием.

В связи с многофункциональным характером проявления активности окислительно-восстановительных ферментов в метаболизме растений и возможностью их взаимозаменяемости в осуществлении многих процессов их жизнедеятельности, в данном случае источниками полифенолоксидазной активности, скорее всего, являлись органические соединения иной химической природы. В подтверждение этому свидетельствовало проявление в ряде случаев сильной положительной связи с содержанием в плодах титруемых кислот, растворимых сахаров, а также пектиновых и дубильных веществ (см. табл. 1). Указания на возможность участия свободных органических кислот в окислительно-восстановительных процессах в растительных клетках встречаются в работе Н. А. Алексеевны с соавт. [27]. При этом в сортовом ряду голубики для активности ПФО и ПО выявлена разная степень проявления их корреляционных связей с содержанием дубильных и пектиновых веществ. Возможность участия последних в формировании антиоксидантных свойств растительных объектов показана в работах А. А. Злобина с соавт., Ж. А. Рупасовой с соавт. [4, 24], что является еще одним подтверждением гибкости комплекса терминальных оксидаз в обеспечении антирадикальных свойств ягодной продукции данного вида.

Особый интерес в структуре корреляционных связей полифенолоксидазной активности плодов вызывает проявление в ряде случаев ее прямого тесного взаимодействия с содержанием растворимых сахаров (см. табл. 1). В исследованиях М. Kofroňová с соавт. [29] доказана способность углеводов (особенно сахарозы, рафинозы и фруктозы) обеспечивать антиоксидантную защиту растений за счет предоставления энергии и молекул углерода для синтеза ферментов окислительно-восстановительного цикла. Кроме того, сахароза в сочетании с глюкозой может контролировать экспрессию генов, связанных со стрессоустойчивостью, что особенно важно для адаптации интродуцируемых растений к новым почвенно-климатическим условиям. По мнению этих авторов, передача сигналов, опосредованная сахарозой, важна для регуляции синтеза аскорбата и фенольных соединений, в том числе антоциановых пигментов, что подтвердилось и в наших исследованиях проявлением у тестируемых сортов голубики положительных связей разной силы между активностью ПФО и содержанием в плодах растворимых сахаров. Вместе с тем, несмотря на то что аскорбиновая кислота является общепризнанным стабилизатором фенольных соединений [23, 30], которыми так богаты плоды голубики, ее роль в повышении их антирадикального статуса, как и в активизации работы исследуемых ферментов окислительно-восстановительного цикла, оказалась минимальной.

Подобно КАТ и ПО, у активности ПФО выявлены заметные генотипические различия по спектрам органических соединений, являющихся источниками данной активности (см. табл. 1). Заметим, что при диапазоне варьирования в таксономическом ряду количества самых тесных прямых связей между активностью данного фермента и содержанием действующих веществ от 2 до 9, наибольшим оно было, как и у пероксидазной активности, у раннеспелого сорта *Hannah's Choice*, а наименьшим – у позднеспелого сорта *Rubel*. При этом среди трех исследуемых сортовых групп голубики минимальным количеством сильных положительных связей у активности ПФО характеризовались позднеспелые сорта. Заметим, что на фоне выявленных генотипических различий в структуре корреляционных связей у раннеспелых и среднеспелых сортов обнаружено определенное сходство в спектрах органических соединений, являвшихся источниками полифенолоксидазной активности. В частности, для всех без исключения представителей этих сортовых групп установлены наиболее сильные прямые корреляционные связи с содержанием гидроксикоричных кислот, тогда как среди позднеспелых сортов подобная связь обнаружена лишь у районированного сорта *Elliott*. Наряду с этим, с учетом связей средней силы, у них вы-

явлено отчетливое взаимодействие активности ПФО с содержанием пектиновых веществ, собственно антоцианов и катехинов, наиболее выраженное у раннеспелых сортов.

Что же касается индивидуальных для каждой сортовой группы доминирующих источников активности данного фермента, то с учетом ее корреляционных связей средней силы с содержанием исследуемых соединений, у раннеспелых сортов к ним следовало отнести свободные органические кислоты, танины и растворимые сахара, а у среднеспелых сортов – лейкоантоцианы. Несмотря на выявленные у исследуемых терминальных оксидаз различия в спектрах связанных с ними компонентов биохимического состава плодов разноспелых сортов голубики, установлено заметное участие всех органических соединений в формировании их антиокислительной системы, но при разной степени его проявления, что подтверждалось наличием между ними прямых корреляционных связей разной силы (см. табл. 1). При этом наибольшее количество самых тесных из них могло свидетельствовать о приоритетной роли каждого органического соединения в обеспечении антирадикальных свойств плодов, тогда как максимальное количество наиболее сильных обратных связей позволяло предположить ингибирующее влияние на них того или иного соединения.

Анализируя табл. 2, можем убедиться, что в сортовом ряду раннеспелых сортов голубики основную роль в обеспечении высокого уровня АОА играли танины, лейкоантоцианы и близкие им по химической природе катехины при менее выраженном участии собственно антоцианов и растворимых сахаров. Основными источниками каталазной активности являлись антоциановые пигменты и в меньшей степени – катехины и флавонолы, тогда как пероксидазной – пектиновые вещества, основные группы биофлавоноидов (особенно катехины) и в меньшей степени – аскорбиновая кислота. Наибольшее участие в обеспечении полифенолоксидазной активности плодов раннеспелых сортов голубики принимали гидроксикоричные кислоты, танины и в меньшей степени – свободные органические кислоты, пектины, антоциановые пигменты и катехины.

В сортовом ряду среднеспелых сортов голубики приоритетная роль в обеспечении антирадикальной активности плодов принадлежала танинам и в меньшей степени – свободным органическим и гидроксикоричным кислотам, а также антоциановым пигментам. При этом основными источниками каталазной активности следовало признать гидроксикоричные и в меньшей степени – титруемые кислоты, а также танины, лейкоантоцианы и катехины, тогда как таковыми пероксидазной активности – свободные органические кислоты, биофлавоноиды, пектиновые и дубильные вещества, а полифенолоксидазной – гидроксикоричные кислоты и лейкоантоцианы.

Что касается позднеспелых сортов голубики, то у них основными источниками АОА плодов являлись танины, лейкоантоцианы и в меньшей степени – флавонолы, катехины и свободные органические кислоты. Значительное участие в обеспечении их каталазной активности принимало абсолютное большинство органических соединений при лидирующем положении танинов, лейкоантоцианов и катехинов, а в активизации фермента ПО основную роль играли пектиновые и дубильные вещества, катехины и в меньшей степени – растворимые сахара. Приоритетное положение в обеспечении полифенолоксидазной активности плодов позднеспелых сортов голубики принадлежало собственно антоцианам и флавонолам (см. табл. 2).

На наш взгляд, столь разноплановая картина корреляционных связей исследуемых компонентов антирадикальной системы плодов представителей разных сортовых групп голубики с содержанием в них широкого спектра органических соединений обусловлена генотипическими различиями их биохимического состава и вероятностным включением в метаболические процессы других видов оксидаз, которые остались за рамками настоящих исследований. На основании суммирования в рассматриваемых сортовых рядах количества наиболее тесных прямых связей всех компонентов антиоксидантного комплекса с содержанием исследуемых органических соединений была обозначена нижеприведенная последовательность биохимических характеристик по мере снижения их влияния на совокупность антирадикальных свойств плодов голубики:

раннеспелые сорта: *катехины >> танины > собственно антоцианы = лейкоантоцианы = флавонолы = пектиновые вещества > гидроксикоричные кислоты > свободные органические кислоты = растворимые сахара > аскорбиновая кислота;*

среднеспелые сорта: *гидроксикоричные кислоты > танины = лейкоантоцианы > свободные органические кислоты > пектиновые вещества = собственно антоцианы > катехины > растворимые сахара > аскорбиновая кислота > флавонолы;*

позднеспелые сорта: катехины = танины > лейкоантоцианы > флавонолы > собственно антоцианы > свободные органические кислоты = пектиновые вещества > аскорбиновая кислота = растворимые сахара > гидроксикоричные кислоты.

Нетрудно убедиться в наличии заметного сходства у представителей разных сортовых групп голубики в спектрах наиболее значимых для формирования антиоксидантного комплекса плодов органических соединений, характеризовавшихся наибольшим количеством прямых тесных связей с компонентами данного комплекса. При ориентации на количество этих связей, превышавшее 6, наиболее выразительно данное сходство проявилось у ранне- и позднеспелых сортов и заключалось в наибольшем участии в метаболических процессах в качестве источников антирадикальной и ферментативной активности катехинов, танинов, лейкоантоцианов и флавонолов на фоне наименьшего участия в них аскорбиновой кислоты и растворимых сахаров. При этом у раннеспелых сортов в ряду показателей биохимического состава плодов выявлено незначительное усиление по сравнению с позднеспелыми сортами роли собственно антоцианов, пектиновых веществ и гидроксикоричных кислот на фоне ослабления таковой лейкоантоцианов, флавонолов и аскорбиновой кислоты. В отличие от представителей этих сортовых групп, у среднеспелых сортов голубики наибольшим участием в формировании антиокислительной системы плодов, наряду с танинами и лейкоантоцианами, характеризовались свободные органические и гидроксикоричные кислоты. Но, как и в двух предыдущих случаях, наименьшее влияние на этот процесс оказывали растворимые сахара и аскорбиновая кислота.

Суммирование у каждого исследуемого сорта голубики количества самых тесных прямых связей у отдельных компонентов антиоксидантного комплекса плодов с содержанием в них органических соединений разной химической природы (см. табл. 3) позволило выявить в общем сортовом ряду таксоны с наиболее высокой и, соответственно, наиболее низкой антирадикальной и ферментативной активностью плодов и обозначить их нижеприведенную последовательность в рядах снижения данных показателей:

по общему уровню **антирадикальной и ферментативной активности:** *Hannah's Choice* > *Aurora* > *Bluecrop* > *Rubel* > *Chanticleer* = *Elliott* = *Rubel* > *Bluegold* > *Weymouth* > *Harrison*;

по уровню **АОА:** *Hannah's Choice* > *Chanticleer* = *Bluegold* > *Bluecrop* > *Elliott* = *Aurora* > *Weymouth* > *Harrison* = *Rubel*;

по уровню **активности КАТ:** *Aurora* > *Rubel* > *Elliott* > *Hannah's Choice* = *Bluecrop* = *Harrison* > *Weymouth* > *Chanticleer* = *Bluegold*;

по уровню **активности ПО:** *Hannah's Choice* > *Rubel* > *Aurora* > *Weymouth* = *Chanticleer* > *Bluecrop* = *Harrison* = *Elliott* > *Bluegold*;

по уровню **активности ПФО:** *Hannah's Choice* > *Bluecrop* = *Bluegold* > *Weymouth* = *Chanticleer* > *Elliott* = *Aurora* > *Harrison* > *Rubel*.

Нетрудно убедиться в заметном сходстве последовательности таксонов голубики в приведенных рядах, обусловленном индивидуальным вкладом каждого из них в общую структуру корреляционных связей тесных прямых взаимодействий отдельных составляющих антиоксидантного комплекса плодов с содержанием органических соединений разной химической природы в соответствии с особенностями их биохимического состава.

При этом наибольшим количеством наиболее сильных прямых взаимосвязей характеризовалась антиокислительная система новых интродуцируемых сортов (раннеспелого *Hannah's Choice* и позднеспелого *Aurora*), поддержание высокого уровня которой обеспечивалось наиболее значительным в сортовом ряду спектром действующих веществ, являвшихся источниками в первом случае антиоксидантной, пероксидазной и полифенолоксидазной активности, а во втором – каталазной и в меньшей степени – пероксидазной. Заметим, что минимальное число подобных взаимодействий у антирадикальной системы, уступавшее в 1,6–2,1 раза таковому у лидирующих по данному признаку таксонов голубики, выявлено у интродуцируемого сорта *Harrison*, отмеченного довольно слабым участием исследуемых компонентов биохимического состава плодов в обеспечении его антиоксидантной и ферментативной активности.

Заключение. В результате сравнительного исследования в южной агроклиматической зоне Беларуси в таксономическом ряду 6 новых интродуцируемых сортов голубики высокорослой (раннеспелых – *Chanticleer*, *Hannah's Choice*, среднеспелых – *Bluegold*, *Harrison* и позднеспелых – *Bluecrop*, *Elliott*, *Rubel*, *Weymouth*) выявлено, что наиболее значительное сходство в спектрах прямых взаимодействий с компонентами антиоксидантного комплекса плодов наблюдается у представителей сортовых групп с наибольшим участием в формировании антиокислительной системы плодов свободных органических и гидроксикоричных кислот. При этом у раннеспелых сортов в ряду показателей биохимического состава плодов выявлено незначительное усиление по сравнению с позднеспелыми сортами роли собственно антоцианов, пектиновых веществ и гидроксикоричных кислот на фоне ослабления таковой лейкоантоцианов, флавонолов и аскорбиновой кислоты. В отличие от представителей этих сортовых групп, у среднеспелых сортов голубики наибольшим участием в формировании антиокислительной системы плодов, наряду с танинами и лейкоантоцианами, характеризовались свободные органические и гидроксикоричные кислоты. Но, как и в двух предыдущих случаях, наименьшее влияние на этот процесс оказывали растворимые сахара и аскорбиновая кислота.

лых – *Aurora*, *Rubel*), а также соответствующих данным группам спелости районированных сортов *Weymouth*, *Bluecrop* и *Elliott* структуры корреляционных связей между уровнями антиоксидантной и ферментативной активности, с одной стороны, и 12 показателями биохимического состава, с другой, выявлены существенные генотипические различия в ориентации и силе этих связей, обусловленные индивидуальными особенностями биохимического состава тестируемых объектов, свидетельствовавшие о выраженной сортоспецифичности анализируемых признаков.

Раннеспелые сорта голубики характеризовались наиболее высоким уровнем взаимосвязи АОА плодов с органическими соединениями, являющимися источниками преимущественно пероксидазной и полифенолоксидазной активности, тогда как у позднеспелых сортов, обладавших наименьшим уровнем этого взаимодействия, основную роль в ее обеспечении играли соединения, активизировавшие главным образом работу КАТ и ПО, а у среднеспелых сортов, занимавших в этом плане промежуточное положение, приоритетное значение имели действующие вещества, выступавшие в качестве источников каталазной и полифенолоксидазной активности.

Лидирующее положение по общему количеству прямых тесных корреляционных связей ($r > 0,70$) антиоксидантного комплекса плодов у раннеспелых сортов принадлежало сорту *Hannah's Choice*, у среднеспелых – сорту *Bluecrop*, а у позднеспелых – сорту *Aurora*. Максимальное количество сильных положительных связей комплекса биохимических показателей плодов с уровнем АОА выявлено у сортов *Chanticleer*, *Bluegold* и *Hannah's Choice*, с уровнем активности КАТ – у сортов *Elliott* и *Aurora*, с уровнем активности ПО – у сортов *Hannah's Choice* и *Rubel*, а с уровнем активности ПФО – у сорта *Hannah's Choice*. При этом сила и направленность выявленных взаимодействий в значительной степени определялись как генотипом растений, так и природой, и функциональной ролью обозначенных ферментов. Тем не менее для активности каждого из них (как и для АОА) в большинстве случаев обнаружено совпадение наиболее тесных прямых связей с содержанием тех или иных действующих веществ одновременно у нескольких таксонов голубики.

Обосновано участие всех определявшихся органических соединений в формировании антиоксидантного комплекса плодов голубики, но при разной степени проявления у его отдельных компонентов, подтвержденное наличием между ними прямых взаимосвязей разной силы. Выявлено заметное сходство у представителей разных сортовых групп в спектрах наиболее значимых для формирования антиоксидантного комплекса плодов органических соединений, наиболее выразительно проявившееся у ранне- и позднеспелых сортов и заключающееся в доминирующей роли катехинов, танинов, лейкоантоцианов и флавонолов, а у среднеспелых сортов (наряду с танинами и лейкоантоцианами) – также свободных органических и гидроксикоричных кислот. При этом наименьшее влияние на антирадикальные свойства плодов голубики оказывали растворимые сахара и аскорбиновая кислота.

Установлена однотипная последовательность таксонов голубики в порядке снижения уровня взаимодействия отдельных компонентов антиоксидантного комплекса плодов с содержанием органических соединений разной химической природы при наибольшем проявлении наиболее сильных прямых корреляционных связей с источниками антиоксидантной, пероксидазной и полифенолоксидазной активности у сорта *Hannah's Choice*, с источниками каталазной – у сорта *Aurora* и в меньшей степени пероксидазной активности на фоне минимального количества подобных взаимодействий – у сорта *Harrison*, уступавшего в 1,6–2,1 раза по данному признаку лидирующим таксонам голубики.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список использованных источников

1. Генотипические особенности биохимического состава и антиоксидантного комплекса плодов сортов голубики высокорослой (*Vaccinium corymbosum* L.) в условиях Беларуси / Ж. А. Рупасова, С. Н. Авраменко, К. А. Добрянская [и др.] // Природопользование. – 2024. – № 1. – С. 185–196.
2. Активность компонентов антиоксидантной системы дикорастущих видов растений Беларуси / В. И. Домаш, О. А. Иванов, Т. П. Шарпио, С. А. Забрейко // Современные проблемы естествознания в науке и общеобразовательном процессе: материалы Респ. науч.-практ. конф. 24 нояб. 2017 г., Минск / редкол.: И. А. Жукова (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2017. – С. 77–79.

3. Антиоксидантная активность белков отдельных видов дикорастущих растений Беларуси и Монголии / В. И. Домаш, О. А. Иванов, Т. П. Шарпио [и др.] // Ботаника (исследования): сб. науч. тр. / Ин-т эксперимент. ботаники НАН Беларуси. – Минск, 2017. – Вып. 46. – С. 190–199.
4. Злобин, А. А. Антиоксидантная и антимикробная активность пектинов ряда растений европейского севера России / А. А. Злобин, Е. А. Мартинсон, Ю. С. Оводов // Известия Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. – 2011. – № 3 (7). – С. 33–37.
5. Большой практикум «Биохимия». Лабораторные работы: учеб. пособие / сост.: М. Г. Кусакина, В. И. Суворов, Л. А. Чудинова. – Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2012. – 107 с.
6. Марсов, Н. Г. Фитохимическое изучение и биологическая активность брусники, клюквы и черники: дис. ... канд. фармацевт. наук: 15.00.02 / Марсов Николай Григорьевич; Перм. гос. фармацевт. акад. – Пермь, 2006. – 200 л.
7. Методика определения антоцианов в плодах аронии черноплодной / В. Ю. Андреева, Г. И. Калинкина, Н. Э. Коломиец, Н. В. Исайкина // Фармация. – 2013. – № 3. – С. 19–21.
8. Методы биохимического исследования растений / А. И. Ермаков, В. В. Арасимович, Н. П. Ярош, Ю. В. Перуанский; под ред. А. И. Ермакова. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Агропромиздат. Ленингр. отд-ние, 1987. – 429 с.
9. Методы определения сухих веществ: ГОСТ 8756.2-82. – Введ. 01.01.1983. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 5 с.
10. Определение содержания дубильных веществ в лекарственном растительном сырье // Государственная фармакопея Союза Советских Социалистических Республик / М-во здравоохранения СССР; редкол.: Ю. Г. Бобков [и др.]. – 11-е изд. – М., 1987. – Вып. 1: Общие методы анализа. – С. 286–287.
11. Скорикова, Ю. Г. Методика определения антоцианов в плодах и ягодах / Ю. Г. Скорикова, Э. А. Шафтан // Труды III Всесоюзного семинара по биологически активным (лечебным) веществам плодов и ягод, 27–30 сент. 1966 г., Свердловск / М-во высш. и сред. спец. образования РСФСР; Урал. лесотехн. ин-т. – Свердловск, 1968. – С. 451–461.
12. Swain, T. The phenolic constituents of *Prunus Domestica*. 1. – The quantitative analysis of phenolic constituents / T. Swain, W. E. Hillis // Journal of the Science of Food and Agriculture. – 1959. – Vol. 10, N 1. – P. 63–68. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740100110>
13. Dung, N. T. Chemical composition, antimicrobial and antioxidant activities of the essential oil and the ethanol extract of *Cleistocalyx operculatus* (Roxb.) Merr and Perry buds / N. T. Dung, J. M. Kim, S. C. Kang // Food and chemical toxicology. – 2008. – Vol. 46, N 12. – P. 3632–3639. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2008.09.013>
14. Чупахина, Г. Н. Физиологические и биохимические методы анализа растений: практикум / авт.-сост. Г. Н. Чупахина. – Калининград: Калинингр. гос. ун-т, 2000. – 59 с.
15. Кинетические, биохимические и биологические методы анализа. Методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине специализации «Кинетические, биохимические и биологические методы анализа» для студентов специальности 04.05.01 «Фундаментальная и прикладная химия» / Курган. гос. ун-т, сост. Л. В. Мостальгина. – Курган: [б. и.], 2016. – 30 с.
16. Воскресенская, О. Л. Большой практикум по биоэкологии: учеб. пособие / О. Л. Воскресенская, Е. А. Алябышева, М. Г. Половникова. – Йошкар-Ола: Мар. гос. ун-т, 2006. – Ч. 1. – 107 с.
17. Лакин, Г. Ф. Биометрия: учеб. пособие для биол. спец. вузов / Г. Ф. Лакин – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1990. – 352 с.
18. Генотипические особенности взаимосвязи компонентов антиоксидантного комплекса плодов жимолости синей с содержанием органических соединений разной химической природы при интродукции в Беларуси / Ж. А. Рупасова, С. Н. Авраменко, К. А. Добрянская [и др.] // Вестник Фонда фундаментальных исследований. – 2024. – № 4. – С. 49–63.
19. Карабанов, И. А. Флавоноиды в мире растений / И. А. Карабанов. – Минск: Ураджай, 1981. – 79 с.
20. Запрометов, М. Н. Фенольные соединения: распространение, метаболизм и функции в растениях / М. Н. Запрометов. – М.: Наука, 1993. – 272 с.
21. Jakovljevic, Z. D. Seasonal variability of *Chelidonium majus* L. secondary metabolites content and antioxidant activity / Z. D. Jakovljevic, S. M. Stankovic, D. M. Topuzovic // Experimental and clinical sciences journal. – 2013. – Vol. 12. – P. 260–268.
22. Jiménez, M. Myricetin, an antioxidant flavonol, is a substrate of polyphenol oxidase / M. Jiménez, F. García-Carmona // Journal of the Science of Food and Agriculture. – 1999. – Vol. 79, N 14. – P. 1993–2000. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0010\(199911\)79:14<1993::AID-JSFA467>3.0.CO;2-H](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0010(199911)79:14<1993::AID-JSFA467>3.0.CO;2-H)
23. Вольнец, А. П. Фенольные соединения в жизнедеятельности растений / А. П. Вольнец. – Минск: Беларус. навука, 2013. – 283 с.
24. Физиолого-биохимические основы применения микроклонального способа размножения голубики высокорослой для получения оздоровленного посадочного материала / Ж. А. Рупасова, О. В. Чижик, Н. Б. Павловский [и др.]. – Минск: Беларус. навука, 2022. – 136 с.
25. Логвина, А. О. Исследование антирадикальной активности полифенолсодержащих экстрактов каллусных культур *Trigonella foenugraecum* / А. О. Логвина // Биология – наука XXI века: 16-я Пуш. междунар. школа-конф. молодых ученых, Пушино, 16–21 апр. 2012 г.: сб. тез. / Пуш. науч. центр РАН, Пуш. гос. естественно-науч. ин-т. – Пушино, 2012. – С. 183–184.
26. Зайцева, Н. В. Сравнительное исследование химического состава различных органов щавеля конского / Н. В. Зайцева // Аспирантский вестник Поволжья. – 2012. – Т. 12, № 5–6. – С. 279–281.
27. Обзор катализаторов, применяемых в синтезе сложных эфиров ароматических карбоновых кислот / Н. А. Алексеевна, А. С. Плотнокова, Л. А. Бахолдина, А. Л. Верещагин // Прикладные аспекты инноваций в биотехнологии: мате-

риалы Всерос. науч.-практ. конф., посвящ. 20-летию юбилею кафедры «Биотехнология», Бийск, 14–16 июня 2017 г. / Алт. гос. техн. ун-т. – Бийск, 2017. – С. 23–26.

28. Сравнительная оценка антиоксидантных свойств водных экстрактов танидосодержащих лекарственных растений / Е. И. Рябина, Е. Е. Зотова, Н. И. Пономарева, А. П. Васильева // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Химия. Биология. Фармация. – 2011. – № 1. – С. 52–56.

29. Kofroňová, M. Two facets of world arsenic problem solution: crop poisoning restriction and enforcement of phytoremediation / M. Kofroňová, P. Mašková, H. Lipavská // *Planta*. – 2018. – Vol. 248. – P. 19–35. <https://doi.org/10.1007/s00425-018-2906-x>

30. Медведев, С. С. Физиология растений: учеб. для студентов и аспирантов биол. фак. ун-тов / С. С. Медведев. – СПб.: Изд-во С.-Петербур. ун-та, 2004. – 334 с.

References

1. Rupasova Zh. A., Avramenko S. N., Dobryanskaya K. A., Sulim D. O., Pavlovskii N. B., Drozd O. V. Genotypic features of the biochemical composition and antioxidant complex of fruits of highbush blueberry varieties (*Vaccinium corymbosum* L.) in the conditions of Belarus. *Prirodopol'zovanie* [Nature Management], 2024, no. 1, pp. 185–196 (in Russian).

2. Domash V. I., Ivanov O. A., Sharpio T. P., Zabreiko S. A. Activity of components of the antioxidant system of wild plant species of Belarus. *Sovremennye problemy estestvoznaniya v nauke i obshcheobrazovatel'nom protsesse: materialy Respublikanskoj nauchno-prakticheskoi konferentsii, 24 noyabrya 2017 goda, Minsk* [Modern problems of natural science in science and general educational process: materials of the Republican scientific and practical conference, November 24, 2017, Minsk]. Minsk, 2017, pp. 77–79 (in Russian).

3. Domash V. I., Ivanov O. A., Sharpio T. P., Zabreiko S. A., Batkhuu G. Zh., Batsuren T. D., Tuul B. B. Antioxidant activity of proteins of some species of wild plants of Belarus and Mongolia. *Botanika (issledovaniya): sbornik nauchnykh trudov* [Botany (research): collection of scientific papers]. Minsk, 2017, iss. 46, pp. 190–200 (in Russian).

4. Zlobin A. A., Martinson E. A., Ovodov Yu. S. Antioxidant and antimicrobial activity of pectins of some plants of the European North of Russia. *Izvestiya Komi nauchnogo tsentra Ural'skogo otdeleniya Rossiiskoi akademii nauk* [Proceedings of the Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences], 2011, no. 3 (7), pp. 33–37 (in Russian).

5. Kusakina M. G., Suvorov V. I., Chudinova L. A. (ed). *Large workshop "Biochemistry". Laboratory work*. Perm, Perm State National Research University, 2012. 107 p. (in Russian).

6. Marsov N. G. *Phytochemical study and biological activity of cranberries, cranberries and blueberries*. Ph. D. Thesis. Perm, 2006. 200 p. (in Russian).

7. Andreeva V. Yu., Kalinkina G. I., Kolomiets N. E., Isaikina N. V. The method of determining anthocyanins in the fruits of aronia chernoplodnaya. *Farmatsiya* [Pharmacy], 2013, no. 3, pp. 19–21 (in Russian).

8. Ermakov A. I., Arasimovich V. V., Yarosh N. P., Peruanskii Yu. V. *Methods of biochemical research of plants*. 3rd ed. Leningrad, Agropromizdat. Leningradskoe otdelenie Publ., 1987. 429 p. (in Russian).

9. State Standard 8756.2-82. *Methods for the determination of dry substances*. Moscow, Publishing House of Standards, 1982. 5 p. (in Russian).

10. Determination of the content of tannins in medicinal plant raw materials. *State Pharmacopoeia of the Union of Soviet Socialist Republics*. 11th ed. Moscow, 1987, iss. 1, pp. 286–287 (in Russian).

11. Skorikova Yu. G., Shaftan E. A. Methodology for the determination of anthocyanins in fruits and berries. *Trudy III Vsesoyuznogo seminara po biologicheski aktivnym (lechebnym) veshchestvam plodov i yagod, 27–30 sentyabrya 1966 goda, Sverdlovsk* [Proceedings of the III All-Union Seminar on Biologically Active (Medicinal) Substances of Fruits and Berries, September 27–30, 1966, Sverdlovsk]. Sverdlovsk, 1968, pp. 451–461 (in Russian).

12. Swain T., Hillis W. E. The phenolic constituents of *Prunus Domenstica*. 1. – The quantitative analysis of phenolic constituents. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1959, vol. 10, no. 1, pp. 63–68. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740100110>

13. Dung N. T., Kim J. M., Kang S. C. Chemical composition, antimicrobial and antioxidant activities of the essential oil and the ethanol extract of *Cleistocalyx operculatus* (Roxb.) Merr and Perry buds. *Food and chemical toxicology*, 2008, vol. 46, no. 12, pp. 3632–3639. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2008.09.013>

14. Chupakhina G. N. *Hysiological and biochemical methods of plant analysis: practicum*. Kaliningrad, Kaliningrad State University, 2000. 59 p. (in Russian).

15. Mostalygina L. V. (ed.). *Kinetic, biochemical and biological methods of analysis. Methodological guidelines for performing laboratory work in the discipline of specialization "Kinetic, biochemical and biological methods of analysis" for students of the specialty 04.05.01 "Fundamental and Applied Chemistry"*. Kurgan, 2016. 30 p. (in Russian).

16. Voskresenskaya O. L., Alyabyшева E. A., Polovnikova M. G. *A large workshop on bioecology. Pt. I*. Yoshkar-Ola, Mari State University, 2006. 107 p. (in Russian).

17. Lakin G. F. *Biometry*. 4th ed. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1990. 352 p. (in Russian).

18. Rupasova Zh. A., Avramenko S. N., Dobryanskaya K. A., Sulim D. O., Pavlovskii N. B., Ral'tsevich A. V., Belyi P. N., Getko N. V., Vecher N. N. Genotypic features of the interaction of components of the antioxidant complex of blue honeysuckle fruits containing organic compounds of different chemical nature during their introduction to Belarus. *Vestnik Fonda fundamental'nykh issledovaniy* [Bulletin of the Foundation for Fundamental Research], 2024, no. 4, pp. 49–63 (in Russian).

19. Karabanov I. A. *Flavonoids in plants*. Minsk, Uradzhai Publ., 1981. 80 p. (in Russian).

20. Zaprometov M. N. *Phenolic compounds: distribution, metabolism and functions*. Moscow, Nauka Publ., 1993. 272 p. (in Russian).

21. Jakovljevic Z. D., Stankovic S. M., Topuzovic D. M. Seasonal variability of *Chelidonium majus* L. secondary metabolites content and antioxidant activity. *Experimental and clinical sciences journal*, vol. 12, 2013, pp. 260–268.

22. Jiménez M., García-Carmona F. Myricetin, an antioxidant flavonol, is a substrate of polyphenol oxidase. *Journal of Food and Agricultural Science*, 1993, vol. 79, no. 4, pp. 1993–2000. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0010\(199911\)79:14<1993::AID-JSFA467>3.0.CO;2-H](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0010(199911)79:14<1993::AID-JSFA467>3.0.CO;2-H)
23. Volynets A. P. *Phenolic compounds in plant life*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2013. 283 p. (in Russian).
24. Rupasova Zh. A., Chizhik O. V., Pavlovskii N. B., Reshetnikov V. N., Kutas E. N. *Physiological and biochemical bases for the application of the microclonal method of highbush blueberry propagation to obtain green planting material*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2022. 136 p. (in Russian).
25. Logvina A. O. Investigation of the antiradical activity of polyphenol-containing extracts of callus cultures. *Trigonella foenum-graecum*. *Biologiya – nauka XXI veka: 16-ya Pushchinskaya mezhdunarodnaya shkola-konferentsiya molodykh uchenykh, Pushchino, 16–21 aprelya 2012 goda: sbornik tezisev* [Biology – Science of the 21st Century: 16th Pushchino International School-Conference of Young Scientists, Pushchino, April 16–21, 2012: Abstracts]. Pushchino, 2012, pp. 183–184 (in Russian).
26. Zaitseva N. V. Comparative study of the chemical composition of various organs of horse sorrel. *Aspirantskii vestnik Povolzh'ya* [Postgraduate Bulletin of the Volga Region], 2012, vol. 12, no. 5–6, pp. 279–281.
27. Alekseevna N. A., Plotnikova A. S., Bakholdina L. A., Vereshchagin A. L. Review of catalysts used in the synthesis of aromatic carboxylic acid esters. *Prikladnye aspekty innovatsii v biotekhnologii: materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, posvyashchennoi 20-letnemu yubileyu kafedry "Biotekhnologii", Biisk, 14–16 iyunya 2017 goda* [Applied aspects of innovations in biotechnology: materials of the All-Russian scientific and practical conference dedicated to the 20th anniversary of the Department of Biotechnology, Biysk, June 14–16, 2017]. Biysk, 2017, pp. 23–26 (in Russian).
28. Ryabinina E. I., Zotova E. E., Ponomareva N. I., Vasil'eva A. P. Comparative assessment of antioxidant properties of aqueous extracts of tannin-containing medicinal plants. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Khimiya. Biologiya. Farmatsiya* [Bulletin of Voronezh State University. Series Chemistry. Biology. Pharmacy], 2011, no. 1, pp. 52–56 (in Russian).
29. Kofroňová M., Mašková P., Lipavská H. Two facets of world arsenic problem solution: crop poisoning restriction and enforcement of phytoremediation. *Planta*, 2018, vol. 248, pp. 19–35. <https://doi.org/10.1007/s00425-018-2906-x>
30. Medvedev S. S. *Plant physiology*. St. Petersburg, Publishing house of St. Petersburg University, 2004. 334 p. (in Russian).

Информация об авторах

Рупасова Жанна Александровна – член-корреспондент, д-р биол. наук, профессор, главный научный сотрудник. Центральный ботанический сад НАН Беларуси (ул. Сурганова, 2в, 220012, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: J.Rupasova@cbg.org.by

Авраменко Станислав Николаевич – мл. науч. сотрудник, магистрант. Центральный ботанический сад НАН Беларуси (ул. Сурганова, 2в, 220012, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: auramenkastas@gmail.com

Ушакова Анна Владимировна – мл. науч. сотрудник. Центральный ботанический сад НАН Беларуси (ул. Сурганова, 2в, 220012, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: uschakowaanna_19@mail.ru

Павловский Николай Болеславович – канд. биол. наук, доцент, заведующий отраслевой лабораторией. Центральный ботанический сад НАН Беларуси (ул. Сурганова, 2в, 220012, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: pavlovskiy@tut.by

Дрозд Ольга Владимировна – науч. сотрудник. Центральный ботанический сад НАН Беларуси (ул. Сурганова, 2в, 220012, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: Drozd_OlgaW@rambler.ru

Белый Павел Николаевич – канд. биол. наук, доцент, ученый секретарь. Центральный ботанический сад НАН Беларуси (ул. Сурганова, 2в, 220012, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: belyj@cbg.org.by

Шпитальная Тамара Васильевна – канд. биол. наук, заведующий лабораторией. Центральный ботанический сад НАН Беларуси (ул. Сурганова, 2в, 220012, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: T.Shpitalnaya@cbg.org.by

Вечер Николай Николаевич – канд. биол. наук, доцент. Белорусский государственный аграрный технический университет (пр-т Независимости, 99, 220023, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: vnn.agr@bsatu.by

Information about the authors

Zhanna A. Rupasova – Corresponding Member, D. Sc. (Biol.), Professor, Chief Researcher. Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus (2v, Sarganov Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: J.Rupasova@cbg.org.by

Stanislav N. Avramenko – Junior Researcher. Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus (2v, Sarganov Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: auramenkastas@gmail.com

Anna V. Ushakova – Junior Researcher. Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus (2v, Sarganov Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: uschakowaanna_19@mail.ru

Nikolay B. Pavlovsky – Ph. D. (Biol.), Associate Professor, Head of the Laboratory. Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus (2v, Sarganov Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: pavlovskiy@tut.by

Olga V. Drozd – Researcher. Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus (2v, Sarganov Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Drozd_OlgaW@rambler.ru

Pavel N. Bely – Ph. D. (Biol.), Associate Professor, Scientific Secretary. Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus (2v, Sarganov Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: belyj@cbg.org.by

Tamara V. Shpitalnaya – Ph. D. (Biol.), Head of the Laboratory. Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus (2v, Sarganov Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: T.Shpitalnaya@cbg.org.by

Nikolay N. Vecher – Ph. D. (Biol.), Associate Professor. Belarusian State Agrarian Technical University (BSATU) (Independence Avenue, 99, 220023, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vnn.agr@bsatu.by

ISSN 1029-8940 (Print)
ISSN 2524-230X (Online)
УДК 577.115:615.322
<https://doi.org/10.29235/1029-8940-2025-70-1-24-30>

Поступила в редакцию 17.06.2024
Received 17.06.2024

Е. В. Феськова¹, В. Н. Леонтьев¹, А. Ю. Тарасевич², В. В. Титок²

¹Белорусский государственный технологический университет, Минск, Республика Беларусь

²Центральный ботанический сад НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

ЖИРНОКИСЛОТНЫЙ СОСТАВ ЛИПИДОВ СЕМЯН БАЗИЛИКА ТОНКОЦВЕТКОВОГО (*OCIMUM TENUIFLORUM* L.) И БАЗИЛИКА ОБЫКНОВЕННОГО (*OCIMUM BASILICUM* L.)

Аннотация. В работе представлены результаты исследования жирнокислотного состава липидов семян двух видов базилика урожая 2020–2023 гг. Отмечены видовая специфичность и вариабельность в содержании олеиновой и α -линоленовой кислот. В липидах семян базилика тонкоцветкового (*Ocimum tenuiflorum* L.) преобладали α -линоленовая и линолевая жирные кислоты (более 56 и 20 % соответственно), а в липидах семян базилика обыкновенного (*Ocimum basilicum* L.) – α -линоленовая, олеиновая и линолевая (около 47, 21 и 20 % соответственно). Установлено, что в 2022 г., который характеризовался наименьшей суммой осадков за период с мая по август, содержание линолевой кислоты по сравнению с таковым в 2020, 2021 и 2023 гг. возросло: коэффициент изменчивости (КИ) составил 9,40 % для базилика тонкоцветкового и 7,34 % для базилика обыкновенного, а содержание α -линоленовой кислоты снизилось: КИ – 4,34 и 6,39 % соответственно. В 2023 г. (наименьшие отклонения температур от климатической нормы за период с мая по август) наблюдалось увеличение содержания пальмитиновой и стеариновой кислот и уменьшение содержания линолевой кислоты в липидах семян базилика тонкоцветкового и увеличение содержания α -линоленовой кислоты в липидах семян базилика обыкновенного. Для обоих видов базилика характерно наименьшее содержание олеиновой кислоты в 2023 г.

Ключевые слова: базилик тонкоцветковый, базилик обыкновенный, жирнокислотный состав, линолевая кислота, линоленовая кислота, коэффициент изменчивости

Для цитирования: Жирнокислотный состав липидов семян базилика тонкоцветкового (*Ocimum tenuiflorum* L.) и базилика обыкновенного (*Ocimum basilicum* L.) / Е. В. Феськова, В. Н. Леонтьев, А. Ю. Тарасевич, В. В. Титок // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя біялагічных навук. – 2025. – Т. 70, № 1. – С. 24–30. <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2025-70-1-24-30>

Alena V. Feskova¹, Viktor N. Leontiev¹, Anastasiya Yu. Tarasevich², Vladimir V. Titok²

¹Belarusian State Technological University, Minsk, Republic of Belarus

²Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

FATTY ACID COMPOSITION OF SEED LIPIDS OF HOLY BASIL (*OCIMUM TENUIFLORUM* L.) AND COMMON BASIL (*OCIMUM BASILICUM* L.)

Abstract. The article presents the results of study of the fatty acid composition of seed lipids of two basil species during the period of 2020–2023. Species specificity and variability in the content of oleic and α -linolenic acids were noted. The predominant fatty acids in the seed lipids of holy basil (*Ocimum tenuiflorum* L.) are α -linolenic (more than 56 %) and linoleic (more than 20 %) acids, and in the seed lipids of common basil (*Ocimum basilicum* L.) – α -linolenic (about 47 %), oleic (about 21 %) and linoleic (about 20 %) acids. It was found that in 2022 (the lowest amount of precipitation for the period from May to August compared to 2020, 2021 and 2023), the content of linoleic acid increased: the coefficient of variation (CV) was 9.40 % for holy basil and 7.34 % for common basil, and the content of α -linolenic acid decreased: CV was 4.34 and 6.39 %, respectively, for holy and common basil. In 2023 (the smallest temperature deviations for the period from May to August from the climatic norm), an increase in the content of palmitic and stearic acids and a decrease in the content of linoleic acid were observed for holy basil, and an increase in the content of α -linolenic acid for common basil was seen. The both types of basil have the lowest oleic acid content in 2023.

Keywords: holy basil, common basil, fatty acid composition, linoleic acid, linolenic acid, coefficient of variation

For citation: Feskova A. U., Leontiev V. N., Tarasevich A. Yu., Titok V. V. Fatty acid composition of seed lipids of holy basil (*Ocimum tenuiflorum* L.) and common basil (*Ocimum basilicum* L.). *Vesti Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya biyalagichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological series*, 2025, vol. 70, no. 1, pp. 24–30 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2025-70-1-24-30>

Введение. Род Базилик (*Ocimum* L.) – обширный полиморфный род подсемейства Котовниковые (*Nepetoideae*) семейства Яснотковые (*Lamiaceae*), охватывающий более 160 видов, из которых 65–67 являются аборигенными для *Ocimum*, а остальные следует рассматривать как синонимы [1–3]. Систематика рода Базилик считается обширной и сложной, что обусловлено генетическим разнообразием, на которое влияют перекрестное опыление и различные факторы окружающей среды. Данный род является естественным для тропических и субтропических районов Африки (встречается максимальное количество видов), тропической Азии и Южной Америки, интродуцирован в Европе, Монголии, Казахстане, Южной Австралии, Южно-Европейской части России, некоторых штатах США, Китае [1, 2].

Базилик называют королем трав из-за его широкого использования в традиционной медицине, парфюмерной и фармацевтической промышленности. Он обладает противовоспалительными, обезболивающими, спазмолитическими, антидиабетическими, ранозаживляющими, антиоксидантными, радиационно-защитными, иммуномодулирующими, противомикробными, противоопухолевыми свойствами [1, 4, 5]. На основе базилика изготавливают препараты, широко применяемые при болезнях почек, желчного пузыря, его используют для лечения состояний, при которых вероятно опасность возникновения кровотечений, для лечения тревоги, тошноты, лихорадки, инфекционных заболеваний, как противоглистное средство, в виде отвара при кашле [4, 6].

Базилик тонкоцветковый (*Ocimum tenuiflorum* L.), или священный, – самый известный вид рода *Ocimum*, который культивируется во всем мире из-за его лекарственного, парфюмерного, религиозного, церемониального, пищевого значения. Токсикологические исследования показали, что данный вид базилика нетоксичен и безопасен для человека [5].

Базилик обыкновенный (*Ocimum basilicum* L.), или царственный (базилик камфорный, базилик огородный, базилик душистый, красный василек, райхон узбекский, реан армянский, рейган азербайджанский, базилик сладкий), содержит различные биологически активные вещества с выраженными питательными и антиоксидантными свойствами [4]. Как целебное растение упоминается в работах Теофраста, Гиппократ, Диоскорида [7].

Широкое применение базилика связано в основном с биологическими свойствами компонентов его эфирного масла. Однако интерес представляет не только анализ компонентного состава эфирного масла, но и данные по определению жирнокислотного состава липидов семян, которые могут быть использованы для идентификации перспективного растительного сырья и служить основой для непрерывного контроля при производстве продуктов питания и фармацевтических продуктов из семян эфиромасличных культур [8].

Цель данного исследования – сравнительная оценка жирнокислотного состава липидов семян базилика обыкновенного и базилика тонкоцветкового урожаев 2020–2023 гг. из коллекции Центрального ботанического сада (ЦБС) НАН Беларуси.

Объекты и методы исследования. В качестве объектов исследования привлечены два вида из семейства Яснотковые (*Lamiaceae*): базилик обыкновенный (*Ocimum basilicum* L.) и базилик тонкоцветковый (*Ocimum tenuiflorum* L.), представляющие флору тропических и субтропических районов Африки, Азии и Южной Америки. Сохраняемые в коллекции ЦБС НАН Беларуси, они проходят полный цикл развития в полевых условиях, образуют зрелое семенное потомство.

Базилик обыкновенный – травянистый однолетник с прямым разветвленным стеблем высотой 40–60 см. Листья супротивные, продолговато-яйцевидные, короткочерешковые. Плод состоит из четырех орешков коричнево-черного цвета, которые после созревания отделяются один от другого. Масса 1000 семян – 0,5–0,8 г.

Базилик тонкоцветковый – многолетнее травянистое растение, представляющее собой прямой многоветвленный кустарник высотой до 12–24 см, – также выращивается как однолетнее растение. Листья зеленого или фиолетового цвета, короткочерешковые, продолговато-яйцевидные, редко-зубчатые, до 5 см длиной.

Количественное определение жирнокислотного состава липидов в семенах проводили по модифицированному методу Welch [9], используя описанную ранее методику [10]. Метилловые эфиры жирных кислот идентифицировали по времени их удерживания при разделении стандартных смесей этих веществ (AccuStandart, США) и оценивали в процентах от весового суммарного содержания по отношению к внутреннему стандарту (маргариновой кислоте).

Все экстракционные и хроматографические анализы проводили в трех повторностях. Достоверность генотипических различий жирнокислотного состава липидов оценивали по наименьшей существенной разнице при $p < 0,05$ (НСР₀₅).

Результаты и их обсуждение. Климатические данные за период 2020–2023 гг. получены с метеорологической станции Минск (местоположение метеостанции: 53°55'43" с. ш., 27°38'7" в. д., высота над уровнем моря 231 м) [11] и представлены в табл. 1 (местоположение ЦБС: 53°54'58" с. ш., 27°36'45" в. д.).

Т а б л и ц а 1. Метеорологические показатели в период 2020–2023 гг.

Table 1. Meteorological indicators for the period of 2020–2023 years

Показатель	Май	Июнь	Июль	Август
2020 г.				
Средняя температура за месяц, °С/ отклонение от климатической нормы, °С	10,4/–3,0	19,2/+2,1	17,4/–1,7	17,8/–0,4
Осадки, мм/% от климатической нормы	52/80	133/149	69/78	61/89
2021 г.				
Средняя температура за месяц, °С/ отклонение от климатической нормы, °С	11,5/–1,9	19,2/+2,1	21,9/+2,8	16,9/–1,3
Осадки, мм/% от климатической нормы	113/171	84/107	41/43	74/104
2022 г.				
Средняя температура за месяц, °С/ отклонение от климатической нормы, °С	10,8/–2,6	18,3/+1,2	17,9/–1,2	20,5/+2,3
Осадки, мм/% от климатической нормы	87/132	50/64	91/94	12/17
2023 г.				
Средняя температура за месяц, °С/ отклонение от климатической нормы, °С	12,1/–1,3	17,9/+0,8	18,3/–0,8	20,4/+2,2
Осадки, мм/% от климатической нормы	7/10	45/57	149/154	86/121

Период с мая по август 2022 г. характеризовался наименьшей суммой осадков по сравнению с 2020, 2021 и 2023 гг., тот же период 2023 г. – наименьшим отклонением температур от климатической нормы.

В мае 2020 г. наблюдалось наибольшее отклонение температуры от климатической нормы, а в мае 2023 г. выпало минимальное количество осадков (на 90 % ниже климатической нормы).

В июне среднемесячная температура во все годы наблюдения была выше климатической нормы. Июнь 2020 г. характеризовался значительными осадками, в 2021 г. количество осадков было близким к климатической норме, а в 2022 и 2023 гг. – на 36 и 43 % соответственно ниже нормы.

Июль 2021 г. был наиболее теплым и засушливым, в остальные годы в этом месяце наблюдалась температура ниже климатической нормы.

Среднемесячная температура августа в 2020 и 2021 гг. была ниже климатической нормы, в 2022 и 2023 гг. – выше климатической нормы. Наиболее близким к климатической норме по выпадению осадков стал 2021 г., а самым засушливым – август 2022 г.

Результаты определения жирнокислотного состава липидов семян базилика обыкновенного и базилика тонкоцветкового урожая 2020–2023 гг. приведены в табл. 2.

Из представленных в табл. 2 данных можно сделать вывод о значительной вариабельности в количественном содержании насыщенных (НЖК), мононенасыщенных (МНЖК) и полиненасыщенных (ПНЖК) жирных кислот у базилика обыкновенного и базилика тонкоцветкового, соотношение омега-6 (C_{18:2}) и омега-3 (C_{18:3 α}) у этих видов было примерно одинаковым и составляло в среднем от 0,34 до 0,40.

Преобладающими жирными кислотами в липидах семян базилика тонкоцветкового являлись α -линоленовая (более 56 %) и линолевая (более 18 %) кислоты, в липидах семян базилика обыкновенного – α -линоленовая (более 43 %), олеиновая (более 16 %) и линолевая (более 17 %).

Согласно анатомо-химически-терапевтической (АТХ) классификации линоленовой и линолевой кислотам присвоены АТХ-коды: линоленовой кислоте – С10АХ06 (омега-3 триглицериды, включая другие эфиры и кислоты), С10АХ (гипохолестеринемические и гипотриглицеридемические препараты и др.), С (препараты для лечения заболеваний сердечно-сосудистой системы) [12]; линолевой кислоте – D02AC02 (линолевая кислота), D02AC52 (линолевая кислота в комбинации), D02AC (препараты, содержащие мягкий парафин и жиры), D (препараты для лечения заболеваний кожи) [13, 14].

Т а б л и ц а 2. Жи́рно́кислотный состав липидов семян базилика обыкновенного и базилика тонкоцветкового урожаев 2020–2023 гг.

Table 2. Fatty acid composition of seed lipids of common basil and holy basil for the period of 2020–2023 years

Жи́рная кислота (C _{a:b})	Содержание жирных кислот в липидах семян, %							
	Базилик обыкновенный				Базилик тонкоцветковый			
	2020 г.	2021 г.	2022 г.	2023 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.	2023 г.
C _{8:0}	–	–	0,56	–	–	0,14	0,15	–
C _{10:0}	–	–	–	0,01	–	–	–	–
C _{14:0}	0,03	0,04	0,03	0,03	–	0,01	0,02	0,03
C _{16:0}	6,61	6,33	8,13	6,18	5,81	5,31	5,27	7,07
C _{16:1}	0,07	0,08	0,07	0,08	0,10	0,08	0,08	0,13
C _{18:0}	3,43	3,40	4,01	3,72	2,89	2,71	2,59	3,66
C _{18:1cis}	20,24	21,66	16,89	15,37	6,50	6,13	9,23	5,82
C _{18:1trans}	0,76	0,78	0,84	0,79	0,73	0,65	0,63	0,89
C _{18:2}	18,53	17,31	20,65	19,11	20,39	20,92	23,04	18,31
C _{18:3α}	46,60	47,47	43,79	51,11	61,37	62,03	56,50	61,74
C _{20:0}	0,32	0,31	0,57	0,38	0,24	0,23	0,22	0,30
C _{20:1}	0,18	0,17	0,21	0,18	0,08	0,08	0,10	0,08
C _{20:2}	0,10	0,08	0,14	0,11	0,07	0,03	0,08	0,07
C _{21:0}	0,03	0,02	0,03	0,03	0,00	0,02	0,01	0,02
C _{22:0}	0,31	0,11	0,25	0,13	0,07	0,08	0,10	0,10
C _{22:1}	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
C _{23:0}	0,06	0,05	0,57	0,09	0,03	0,02	0,04	0,03
C _{24:0}	0,20	0,15	0,02	0,21	0,08	0,01	0,08	0,13
НЖК	10,99	10,41	14,17	10,78	9,10	8,54	8,50	11,34
МНЖК	21,26	22,71	18,03	16,43	7,42	6,95	10,05	6,92
ПНЖК	65,22	64,86	64,58	70,33	81,84	82,97	79,62	80,11
Омега-6 (C _{18:2}):омега-3 (C _{18:3α})	0,40	0,36	0,47	0,37	0,33	0,34	0,41	0,30

П р и м е ч а н и е. Здесь и в табл. 3: *a:b* – соотношение числа атомов углерода и количества двойных связей.

В результате исследований установлено, что содержание преобладающих жирных кислот в липидах семян исследованных видов базилика в период с 2020 по 2021 г. практически не изменялось.

В 2022 г., который характеризовался наименьшей суммой осадкой за период с мая по август по сравнению с 2020, 2021 и 2023 гг., содержание линолевой кислоты возрастало (коэффициент изменчивости (КИ) составил 9,40 % для базилика тонкоцветкового и 7,34 % для базилика обыкновенного), а α-линоленовой кислоты снижалось (КИ – 4,34 и 6,39 % соответственно).

В 2023 г. (наименьшие отклонения температур от климатической нормы за период с мая по август) у базилика тонкоцветкового наблюдалось увеличение содержания пальмитиновой и стеариновой кислот и уменьшение содержания линолевой кислоты; у базилика обыкновенного – увеличение содержания α-линоленовой кислоты. Для обоих видов базилика характерно наименьшее содержание олеиновой кислоты в 2023 г.

В табл. 3 приведены литературные данные о жирнокислотном составе липидов семян базилика тонкоцветкового и базилика обыкновенного, произрастающих в различных географических и климатических регионах.

Таблица 3. Жирнокислотный состав липидов семян базилика обыкновенного и базилика тонкоцветкового, произрастающих в различных географических и климатических регионах, %

Table 3. Fatty acid composition of seed lipids of common basil and holy basil growing in different geographical and climatic regions, %

Жирная кислота (C _{a:b})	Базилик обыкновенный								Базилик тонкоцветковый	
	Судан, Африка [15]	Бодуппал, Индия [16]	Иран [17]	Индиана, США [18]	Сингапур [19]	Пакистан [19]	Вьетнам [19]	Турция [20]	Лакхнау, Индия [5]	Индиана, США [19]
C _{16:0}	13,38	8,00–9,20	6,23–10,16	6,80–8,80	7,72	5,89	5,70	8,31–9,78	6,94	11,0
C _{16:1}	0,78	0,20	НД	0,20–0,30	НД	НД	НД	НД	НД	0,20
C _{18:0}	6,55	3,60–3,80	2,97–4,88	2,00–2,80	2,24	4,41	2,99	2,10–3,23	2,10	4,00
C _{18:1cis}	НД	10,30–12,30	6,22–19,92	8,70–11,60	5,59	7,21	19,02	10,56–15,72	9,00	13,30
C _{18:2}	32,18	23,40–26,00	16,73–24,93	18,30–21,70	85,59	18,60	19,82	21,02–25,62	66,10	26,80
C _{18:3α}	43,92	49,30–52,40	42,45–61,85	57,40–62,50	0,34	66,02	62,29	45,51–51,00	15,70	43,80
C _{20:0}	0,72	0,20–0,30	НД	0,20	НД	НД	НД	0,2	НД	0,20
Омега-6 (C _{18:2}): омега-3 (C _{18:3α})	0,73	0,47–0,50	0,39–0,40	0,32–0,35	251,74	0,28	0,32	0,46–0,50	4,21	0,61

Примечание. НД – нет данных.

Как видно из данных, приведенных в табл. 2, 3, содержание индивидуальных жирных кислот в липидах семян базилика тонкоцветкового и базилика обыкновенного значительно отличается в зависимости от региона произрастания вида. По количественному содержанию индивидуальных жирных кислот и по соотношению омега-6 и омега-3 жирных кислот в липидах семян базилика обыкновенного, интродуцированного в ЦБС, схожими являются семена базилика обыкновенного, произрастающего в Иране и Индии. Содержание жирных кислот в липидах семян базилика тонкоцветкового, произрастающего на территории Республики Беларусь, отличается от представленных в литературе данных.

Заключение. Проведен сравнительный анализ жирнокислотного состава липидов семян базилика обыкновенного и базилика тонкоцветкового, интродуцированных в ЦБС. Установлено, что за четыре года наблюдения наибольшее изменение содержания пальмитиновой, стеариновой, олеиновой, линолевой кислот характерно для липидов семян базилика тонкоцветкового, а α-линоленовой – для липидов семян базилика обыкновенного. КИ по содержанию жирных кислот в липидах семян базилика тонкоцветкового и базилика обыкновенного составили: для пальмитиновой кислоты – 14,33 и 13,15 %, для стеариновой – 16,24 и 7,88 %, для олеиновой – 22,62 и 15,70 %, для линолевой – 9,40 и 7,34 %, для α-линоленовой – 4,34 и 6,39 % соответственно.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Работа выполнена в рамках НИР «Идентификация и анатомо-терапевтическо-химическая классификация биологически активных соединений коллекции лекарственных растений Центрального ботанического сада НАН Беларуси» ГПНИ «Химические процессы, реагенты и технологии, биорегуляторы и биоорхимия».

Acknowledgements. The work was carried out within the framework of the research project “Identification and anatomical-therapeutic-chemical classification of biologically active compounds from the collection of medicinal plants of the Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus” of the state scientific research program “Chemical processes, reagents and technologies, bioregulators and bioorgchemistry”.

Список использованных источников

1. Diversity of the genus *Ocimum* (*Lamiaceae*) through morpho-molecular (RAPD) and chemical (GC-MS) analysis / T. Chowdhury, A. Mandal, S. C. Roy, D. De Sarker // Journal of Genetic Engineering and Biotechnology. – 2017. – Vol. 15, N 1. – P. 275–286. <https://doi.org/10.1016/j.jgeb.2016.12.004>
2. *Ocimum* L. // Plants of the World Online. – URL: <https://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:21070-1#children> (date of access: 10.01.2024).

3. *Ocimum* L. // WFO Plant List. – URL: https://wfo.plantlist.org/taxon/wfo-4000026511-2023-12?page=1&hide_syns=true (date of access: 10.01.2024).
4. Poonkodi, K. Chemical composition of essential oil of *Ocimum basilicum* L. (Basil) and its biological activities – an overview / K. Poonkodi // *Journal of Critical Reviews*. – 2016. – Vol. 3, N 3. – P. 56–62.
5. Singh, D. A review on phytochemical and pharmacological properties of Holy basil (*Ocimum sanctum* L.) / D. Singh, P. K. Chaudhuri // *Industrial Crops and Products*. – 2018. – Vol. 118. – P. 367–382. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.03.048>
6. Христова, Ю. П. Исследование компонентного состава эфирных масел представителей рода *Ocimum* L. в условиях Южного берега Крыма / Ю. П. Христова // Сборник научных трудов Никитского ботанического сада. – 2011. – Т. 133. – С. 236–248.
7. Исследование *Ocimum basilicum* L. в рамках научного направления «Фармацевтический ремейк» / Д. И. Писарев, И. А. Севрук, А. Ю. Малютин [и др.] // *Научный результат. Сер. Медицина и фармация*. – 2016. – Т. 2, № 2. – С. 54–61.
8. Генетический полиморфизм жирнокислотного состава липидов семян масличных культур / И. В. Лайковская, В. В. Титок, В. Н. Леонтьев, И. Л. Акулович // *Труды Белорусского государственного технологического университета*. Сер. 4, Химия и технология органических веществ. – 2004. – Вып. 12. – С. 179–183.
9. Welch, R. W. A micro-method for the estimation of oil content and composition in seed crops / R. W. Welch // *Journal of the Science of Food and Agriculture*. – 1977. – Vol. 28, N 7. – P. 635–638. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740280710>
10. Жирно-кислотный состав липидов семян некоторых представителей семейства Яснотковые (*Lamiaceae*) / Е. В. Феськова, В. Н. Леонтьев, В. В. Титок, В. Ю. Анощенко // *Природные ресурсы*. – 2022. – № 1. – С. 105–109.
11. Погода и климат [сайт]. – 2004–2024. – URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/forecast/26850.htm> (дата обращения: 05.10.2023).
12. ICDcode.info [сайт] / ATX-код C10AX. – URL: <https://icdcode.info/russian/atc/code-c10ax.html> (дата обращения: 17.11.2023).
13. ICDcode.info [сайт] / ATC-Index D02AC. – URL: <https://icdcode.info/deutsch/atc/index-d02ac.html> (дата обращения: 17.11.2023).
14. ICDcode.info [сайт] / ATX-код D02AC. – URL: <https://icdcode.info/russian/atc/code-d02ac.html> (дата обращения: 17.11.2023).
15. Physicochemical properties and fatty acid composition of *Ocimum basilicum* L. seed oil / A. A. Idris, A. H. Nour, M. M. Ali [et al.] // *Asian Journal of Physical and Chemical Sciences*. – 2020. – Vol. 8, N 1. – P. 1–12. <https://doi.org/10.9734/ajopacs/2020/v8i130104>
16. Composition of herb and seed oil and antimicrobial activity of the essential oil of two varieties of *Ocimum basilicum* harvested at short time intervals / P. S. Kakaraparathi, K. V. N. Satya Srinivas, J. Kotes Kumar [et al.] // *Journal of Plant Development*. – 2015. – Vol. 22. – P. 59–76.
17. Mostafavai, S. The phytochemical variability of fatty acids in basil seeds (*Ocimum basilicum* L.) affected by genotype and geographical differences / S. Mostafavai, H. A. Asadi-Gharneh, M. Miransari // *Food Chemistry*. – 2019. – Vol. 276. – P. 700–706. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.10.027>
18. Angers, P. Fatty acid variation in seed oil among *Ocimum* species / P. Angers, M. R. Morales, J. E. Simon // *Journal of the American Oil Chemists' Society*. – 1996. – Vol. 73, N 3. – P. 393–395. <https://doi.org/10.1007/bf02523437>
19. Discriminating the origin of basil seeds (*Ocimum basilicum* L.) using hyperspectral imaging analysis / J.-Y. Choi, S. Heo, S. Bae [et al.] // *LWT – Food Science and Technology*. – 2019. – Vol. 118. – Art. 108715. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108715>
20. Determination of seed yield, quality and fixed oil components of different basil (*Ocimum basilicum* L.) genotypes: Evaluation of fatty acid profile by PCA biplot analysis / M. Türkmen, Y. Eren, Y. Z. Aygün, E. N. Ertekin // *Journal of Advanced Research in Natural and Applied Sciences*. – 2022. – Vol. 8, N 3. – P. 453–462. <https://doi.org/10.28979/jarnas.1052498>

References

1. Chowdhury T., Mandal A., Roy S. C., De Sarker D. Diversity of the genus *Ocimum* (*Lamiaceae*) through morpho-molecular (RAPD) and chemical (GC–MS) analysis. *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*, 2017, vol. 15, no. 1, pp. 275–286. <https://doi.org/10.1016/j.jgeb.2016.12.004>
2. *Ocimum* L. *Plants of the World Online*. Available at: <https://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:21070-1#children> (accessed 10.01.2024).
3. *Ocimum* L. *WFO Plant List*. Available at: https://wfo.plantlist.org/taxon/wfo-4000026511-2023-12?page=1&hide_syns=true (accessed 10.01.2024).
4. Poonkodi K. Chemical composition of essential oil of *Ocimum basilicum* L. (Basil) and its biological activities – an overview. *Journal of Critical Reviews*, 2016. vol. 3, no. 3, pp. 56–62.
5. Singh D., Chaudhuri P. K. A review on phytochemical and pharmacological properties of Holy basil (*Ocimum sanctum* L.). *Industrial Crops and Products*, 2018, vol. 118, pp. 367–382. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.03.048>
6. Khristova Yu. P. Study of the component composition of essential oils of representatives of the genus *Ocimum* L. in the conditions of the southern coast of Crimea. *Sbornik nauchnykh trudov Nikitskogo botanicheskogo sada* [Collection of scientific papers of the State Nikitsky Botanical Garden], 2011, vol. 133, pp. 236–248 (in Russian).
7. Novikov O. O., Pisarev D. I., Sevruk I. A., Maljutina A. Yu., Zinchenko A. A., Gur'ev I. V. Study of *Ocimum basilicum* L. within the framework of the scientific direction “pharmaceutical strip”. *Nauchnyi rezul'tat. Seriya: Meditsina i farmatsiya* [Scientific Result. Series Medicine and Pharmacy], 2016, vol. 2, no. 2, pp. 54–61 (in Russian).

8. Laikovskaya I. V., Titok V. V., Leont'ev V. N., Akulovich I. L. Genetic polymorphism of fatty acid composition of lipids of oilseeds. *Trudy Belorusskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya 4. Khimiya i tekhnologiya organicheskikh veshchestv* [Proceedings of the Belarusian State Technological University. Series 4. Chemistry and technology of organic substances], 2004, vol. 12, pp. 179–183 (in Russian).

9. Welch R. W. A micro-method for the estimation of oil content and composition in seed crops. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1977, vol. 28, no. 7, pp. 635–638. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740280710>

10. Feskova E. V., Leontev V. N., Titok V. V., Anoshenko B. Yu. Fatty acid composition of seed lipids of some representatives of the *Lamiaceae* family. *Privodnye resursy* [Natural resources], 2022, no. 1, pp. 105–109 (in Russian).

11. *Weather and climate*. Available at: <http://www.pogodaiklimat.ru/forecast/26850.htm> (accessed 05.10.2023) (in Russian).

12. *ICDcode.info. ATKh-kod C10AX*. Available at: <https://icdcode.info/russian/atc/code-c10ax.html> (accessed 17.11.2023) (in Russian).

13. *ICDcode.info. ATC-Index D02AC*. Available at: <https://icdcode.info/deutsch/atc/index-d02ac.html> (accessed 17.11.2023).

14. *ICDcode.info. ATKh-kod D02AC*. Available at: <https://icdcode.info/russian/atc/code-d02ac.html> (accessed 17.11.2023) (in Russian).

15. Idris A. A., Nour A. H., Ali M. M., Erwa I. Y., Omer Ishag O. A., Nour A. H. Physicochemical properties and fatty acid composition of *Ocimum basilicum* L. seed oil. *Asian Journal of Physical and Chemical Sciences*, 2020, vol. 8, no. 1, pp. 1–12. <https://doi.org/10.9734/ajopacs/2020/v8i130104>

16. Kakaraparthi P. S., Satya Srinivas K. V. N., Kotesh Kumar J., Niranjana Kumar A., Kumar A. Composition of herb and seed oil and antimicrobial activity of the essential oil of two varieties of *Ocimum basilicum* harvested at short time intervals. *Journal of Plant Development*, 2015, vol. 22, pp. 59–76.

17. Mostafavai S., Asadi-Gharneh H. A., Miransari M. The phytochemical variability of fatty acids in basil seeds (*Ocimum basilicum* L.) affected by genotype and geographical differences. *Food Chemistry*, 2019, vol. 276, pp. 700–706. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.10.027>

18. Angers P., Morales M. R., Simon J. E. Fatty acid variation in seed oil among *Ocimum* species. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 1996, vol. 73, no. 3, pp. 393–395. <https://doi.org/10.1007/bf02523437>

19. Choi J.-Y., Heo S., Bae S., Kim J., Moon K.-D. Discriminating the origin of basil seeds (*Ocimum basilicum* L.) using hyperspectral imaging analysis. *LWT – Food Science and Technology*, 2019, vol. 118, art. 108715. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108715>

20. Türkmen M., Eren Y., Aygün Y. Z., Ertekin E. N. Determination of seed yield, quality and fixed oil components of different basil (*Ocimum basilicum* L.) genotypes: Evaluation of fatty acid profile by PCA biplot analysis. *Journal of Advanced Research in Natural and Applied Sciences*, 2022, vol. 8, no. 3, pp. 453–462. <https://doi.org/10.28979/jarnas.1052498>

Информация об авторах

Феськова Елена Владимировна – канд. техн. наук, доцент, ст. науч. сотрудник. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: lena.feskova@mail.ru

Леонтьев Виктор Николаевич – канд. хим. наук, доцент, заведующий кафедрой. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: leontiev@belstu.by

Тарасевич Анастасия Юрьевна – науч. сотрудник. Центральный ботанический сад НАН Беларуси (ул. Сурганова, 2в, 220012, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: erlifgrey@gmail.com

Титок Владимир Владимирович – член-корреспондент, д-р биол. наук, доцент, гл. науч. сотрудник. Центральный ботанический сад НАН Беларуси (ул. Сурганова, 2в, 220012, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: V.Titok@cbg.org.by

Information about the authors

Alena V. Feskova – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Senior Researcher. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlov Str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lena.feskova@mail.ru

Viktor N. Leontiev – Ph. D. (Chem.), Associate Professor, Head of the Department. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlov Str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: leontiev@belstu.by

Anastasiya Yu. Tarasevich – Researcher. Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of the Republic of Belarus (2v, Surganov Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: erlifgrey@gmail.com

Vladimir V. Titok – Corresponding Member, D. Sc. (Biol.), Associate Professor, Chief Researcher. Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus (2v, Surganov Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: V.Titok@cbg.org.by

ISSN 1029-8940 (Print)
 ISSN 2524-230X (Online)
 УДК 581.557.24:577.34
<https://doi.org/10.29235/1029-8940-2025-70-1-31-39>

Поступила в редакцию 15.05.2024
 Received 15.05.2024

А. Н. Никитин^{1,2}, О. А. Шуранкова¹, Е. А. Танкевич¹

¹Институт радиобиологии НАН Беларуси, Гомель, Республика Беларусь

²Институт микробиологии НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

ВЛИЯНИЕ ОБРАБОТКИ СЕМЯН ЯРОВОГО ЯЧМЕНЯ МИКОРИЗОБРАЗУЮЩИМИ ГРИБАМИ РОДА *GLOMUS* НА НАКОПЛЕНИЕ ¹³⁷Cs ВЕГЕТАТИВНЫМИ ОРГАНАМИ РАСТЕНИЙ

Аннотация. Испытания ядерного оружия, штатные и аварийные выбросы радионуклидов объектами ядерного топливного цикла, с одной стороны, и продолжительный период полураспада ¹³⁷Cs, с другой стороны, привели к значительному накоплению этого радиоактивного изотопа в объектах окружающей среды на обширных территориях, что оказало негативное воздействие на состояние биоты и здоровье населения. Поиск эффективных способов ограничения перехода радионуклидов в пищевые цепи и ремедиации загрязненных территорий остается актуальной задачей. Одним из факторов, влияющих на переход ¹³⁷Cs из почвы в растения, является микробиом почвы. Основная гипотеза данной работы состоит в том, что развитие арбускулярной микоризы (АМ) на корневых системах растений приводит к повышению доступности изотопов цезия для корневого поглощения и увеличивает их накопление в подземных и надземных частях растений. В связи с этим цель работы – выявить роль АМ в корневом поступлении ¹³⁷Cs из почвы в модельное растение.

Эксперимент поставлен в условиях микровегетационного опыта, для проведения которого в качестве модельного растения был выбран ячмень обыкновенный сорта Бурштын. Микоризацию корневой системы осуществляли с использованием инокулянта MycoApply SuperConcentrate. Результаты эксперимента позволили впервые показать связь между параметрами накопления и распределения ¹³⁷Cs в растениях ячменя с уровнем развития АМ в корневой системе растения. Развитие микоризной инфекции в корневой системе ячменя привело к росту коэффициента накопления ¹³⁷Cs в надземных органах ячменя в 1,8–2,6 раз по сравнению с контролем. При этом наблюдается тенденция к снижению удельной активности радионуклида в корневой системе.

Ключевые слова: арбускулярная микориза, ячмень обыкновенный, почва, цезий-137, коэффициент накопления, коэффициент транслокации

Для цитирования: Никитин, А. Н. Влияние обработки семян ярового ячменя микоризообразующими грибами рода *Glomus* на накопление ¹³⁷Cs вегетативными органами растений / А. Н. Никитин, О. А. Шуранкова, Е. А. Танкевич // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя біялагічных навук. – 2025. – Т. 70, № 1. – С. 31–39. <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2025-70-1-31-39>

Aleksander N. Nikitin^{1,2}, Olga A. Shurankova¹, Elena A. Tankevich¹

¹Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Republic of Belarus

²Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

INFLUENCE OF SPRING BARLEY SEED TREATMENT WITH MYCORRHIZA-FORMING FUNGI OF THE GENUS *GLOMUS* ON ¹³⁷Cs ACCUMULATION IN THE VEGETATIVE ORGANS OF THE PLANTS

Abstract. Tests of nuclear weapons, routine and accidental releases of radionuclides from nuclear fuel cycle facilities, on one hand, and the long half-life decay time of ¹³⁷Cs have led to significant levels of accumulation of this radioactive isotope in environmental objects in vast territories, which can have a negative impact on biota and public health. The search for effective methods to limit the transfer of radionuclides into food chains and remediate contaminated areas remains a pressing issue. One of the factors influencing the transfer of ¹³⁷Cs from soil to plants is soil microbiom. The main hypothesis of this study is that developing arbuscular mycorrhiza on plant root systems leads to increasing the availability of cesium isotopes for root absorption and enhances their accumulation in underground and aboveground parts of plants. Therefore, the aim of this study was to determine the significance of arbuscular mycorrhiza in the root uptake of ¹³⁷Cs from soil into a model plant.

The vegetative experiment was conducted with barley variety Burshtyn chosen as a model plant. Mycorrhization of the root system was performed using the MycoApply SuperConcentrate inoculant. The results of the experiment allowed for the first time to demonstrate the relationship between accumulation and distribution parameters of ¹³⁷Cs in barley plants with the level of arbuscular mycorrhiza development in the plant root system. Developing mycorrhizal infection in the barley root sys-

tem increased the transfer factor of ^{137}Cs from soil to the aboveground organs of barley 1.8–2.6 times compared to the control. At the same time, there is a tendency towards a decrease in the activity concentration of the radionuclide in the root system.

Keywords: arbuscular mycorrhiza, barley, soil, cesium-137, transfer factor, translocation factor

For citation: Nikitin A. N., Shurankova O. A., Tankevich E. A. Influence of spring barley seed treatment with mycorrhiza-forming fungi of the genus *Glomus* on ^{137}Cs accumulation in the vegetative organs of the plants. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya biyalagichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological series*, 2025, vol. 70, no. 1, pp. 31–39 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2025-70-1-31-39>

Введение. В зависимости от химических и физических свойств радионуклидов, характера выброса в окружающую среду, особенностей поведения в почвенно-растительном комплексе и экологических условий, интенсивность их перехода из почвы в растения может изменяться в довольно широких пределах. Понимание механизмов накопления радионуклидов различными видами растений важно не только для развития радиоэкологии и обеспечения радиационной безопасности населения, но и для разработки новых методов ремедиации загрязненных территорий [1].

Почва – мощный сорбент радиоактивных продуктов деления урана, а ее характеристики во многом определяют поведение отдельных радионуклидов в экосистемах. При корневом поступлении радиоактивных изотопов цезия (RCs) в растения основными факторами, которые лимитируют интенсивность накопления, являются состав почвенного раствора и концентрация в нем радионуклида [2]. В частности, существенное влияние на поведение RCs в системе «почва-растение» оказывает содержание в почвенном растворе катионов калия.

Почвенные микроорганизмы оказывают заметное влияние на характеристики почвы, а также активно взаимодействуют с корневыми системами растений, что не может не отражаться на накоплении RCs последними. Микоризация корневой системы может быть фактором усиления или ослабления накопления ^{90}Sr и ^{137}Cs растениями [3]. Отношение между иммобилизацией и мобилизацией зависит от радионуклида, вида микроорганизма, физико-химических условий среды. В литературе [4–6] описано несколько механизмов взаимодействия микроорганизмов с радионуклидами: биосорбция, биоаккумуляция, биотрансформация, биоминерализация и микробиологически-усиленная хемосорбция. Значительное воздействие на поведение RCs в системе «почва-растение» оказывают грибы. Многие из них замедляют скорость вертикальной миграции RCs, связывая их в своей биомассе [1].

Ассоциация арбускулярной микоризы (АМ) с корневой системой высших растений является, вероятно, одним из самых распространенных в природе видов симбиоза [7, 8]. Около 80 % видов покрытосеменных растений способны к формированию ассоциации с АМ. С одной стороны, симбиоз с АМ позволяет им улучшать рост на почвах, бедных элементами питания, также микориза усиливает накопление растениями фосфора, меди, никеля и цинка [9, 10]. С другой – микроорганизмы ризосферы потребляют органические вещества, которые выделяют растения (включая токсичные отходы жизнедеятельности), а также предупреждают заражение болезнями и вредителями [11]. Функциональные группы на клеточных стенках грибов (амино-, гидроксил-, карбоксил- и другие группы) могут фиксировать ионы и комплексы потенциально токсичных элементов (Cu, Pb, Cd и др.), снижая их биологическую доступность. В ряде работ показано, что АМ может ограничивать поступление высоких концентраций тяжелых металлов в растения [10].

На примере *Plantago lanceolata*, *Medicago truncatula*, *Lolium perenne* показано, что колонизация корневых систем грибом *Glomus intraradices*, образующим эндомикоризу, приводит к существенному уменьшению аккумуляции ^{134}Cs в надземных органах растений [12]. Накопление радионуклида подземными органами в присутствии микоризообразующих грибов либо не имело существенных различий (*P. lanceolata*) по сравнению с растениями без симбиоза, либо усиливалось при микоризации (*M. truncatula*), либо ослаблялось (*L. perenne*). Отношение активности радионуклида в подземных частях к надземным увеличивалось при микоризации корневой системы. В отличие от предыдущих трех видов *Helianthus annuus* отвечал почти десятикратным усилением аккумуляции ^{134}Cs надземными и подземными органами при микоризации корневой системы.

В кратковременном эксперименте с заражением саженцев вереска (*Calluna vulgaris*) инокулянт микоризообразующих грибов наблюдалось снижение накопления в них ^{137}Cs [13]. Однако при этом усилилась транслокация радионуклида из корней в надземные органы.

Таким образом, к настоящему времени установлено, что АМ может значимо влиять на накопление RCs сосудистыми растениями. Однако собранные экспериментальные данные носят фрагментарный и нередко противоречивый характер. Принимая во внимание возможность использования АМ для управления накоплением радионуклидов растениями, целесообразно проводить исследования, направленные на раскрытие закономерностей воздействия микоризообразующих грибов на накопление и перераспределение RCs в сосудистых растениях.

Целью настоящей работы стало выявление зависимости параметров накопления ^{137}Cs модельным злаковым растением от степени развития АМ в его корневой системе.

Объекты и методы исследования. Изучение особенностей корневого поступления ^{137}Cs в растения в зависимости от степени микоризации их корневой системы осуществлялось путем проведения микровегетационного опыта. Модельная культура – ячмень обыкновенный (*Hordeum vulgare*) сорта Бурштын. В качестве источника микоризообразующих грибов использовался инокулянт MусоApply SuperConcentrate, включающий пропагулы четырех видов грибов, образующих АМ: *Glomus intraradices*, *G. mosseae*, *G. aggregatum* и *G. etunicatum*.

Для эксперимента была взята почва минерального происхождения, отобранная в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС, с высоким содержанием техногенных радионуклидов в смеси с торфогрунтом для выращивания рассады в пропорции 1:1. Степень кислотности субстрата, использованного в эксперименте, была близка к нейтральной (рН = 6,94–7,09), содержание кальция – высокое (1628–1651 мг/кг), магния – среднее (122–132 мг/кг). Субстрат имел очень высокое содержание органического вещества (5,42–5,86 %), подвижных форм фосфора (265–306 мг/кг) и очень низкое – подвижного калия (64–82 мг/кг).

Проросшие семена ячменя высевались в специальные контейнеры для выращивания растений объемом 4,5 л, заполненные заранее приготовленным увлажненным субстратом, в количестве 50 шт/контейнер. Сразу после посадки на поверхность субстрата вносился инокулянт MусоApply SuperConcentrate. В зависимости от его дозы эксперимент включал четыре варианта:

1. Контроль (без обработки инокулянтом).
2. 1 мг/50 семян (соответствует рекомендованной дозе обработки).
3. 7,5 мг/50 семян (сверхоптимальная доза обработки).
4. 15 мг/50 семян (сверхоптимальная доза обработки).

Выращивание растений осуществлялось в помещении с регулируемыми условиями при температуре 18 °С, продолжительности светового дня 16 ч (поток фотосинтетически активной радиации (ФАР) 100 мкмоль·м⁻²·с⁻¹) и оптимальном режиме почвенного увлажнения на протяжении 37 сут. Внешний вид растений на момент окончания эксперимента представлен на рис. 1.

По завершении периода выращивания надземные органы ячменя срезались. Затем извлекались корневые системы, которые тщательно очищались от остатков субстрата механически и кратковременным вымыванием в дистиллированной воде. Определялись биометрические показатели растений. Отбирались образцы корней для оценки степени микоризации. Надземные и подземные органы растений высушивались до воздушно-сухого состояния для дальнейшего анализа на содержание техногенных радионуклидов. Из каждого контейнера отбирался образец субстрата для измерения удельной активности ^{137}Cs . Перед измерением он высушивался до воздушно-сухого состояния и просеивался через сито с размером ячейки 2 мм.

Оценка содержания ^{137}Cs в отобранных образцах почвы и растений была проведена с использованием гамма-спектрометрического комплекса CANBERRA с германиевым детектором GX2018, геометрия «дента», ошибка измерения – не более 5 %. Коэффициент накопления (K_n) радионуклида рассчитывался как отношение его удельной активности в органах растений (Бк/кг) к удельной активности в субстрате (Бк/кг). Коэффициент транслокации (K_T , безразмерная величина) рассчитывался как отношение удельной активности радионуклида в надземных органах ($A_y^{\text{надз.}}$) к его удельной активности в подземных органах ($A_y^{\text{подз.}}$). Вынос радионуклида в надземные органы рассчитывался для каждого контейнера как отношение общей активности ^{137}Cs в надземных органах ($A^{\text{надз.}}$) к общей его активности в почвенном субстрате ($A^{\text{почв.}}$), умноженное на 100 %.

Оценку интенсивности микоризообразования проводили с использованием исследовательского микроскопа проходящего света PZO (Польша) по методу А. Trouvelot с соавт. [14]. Рассчитывались встречаемость (F, %) и интенсивность (M, %) микоризной инфекции в корневой системе.

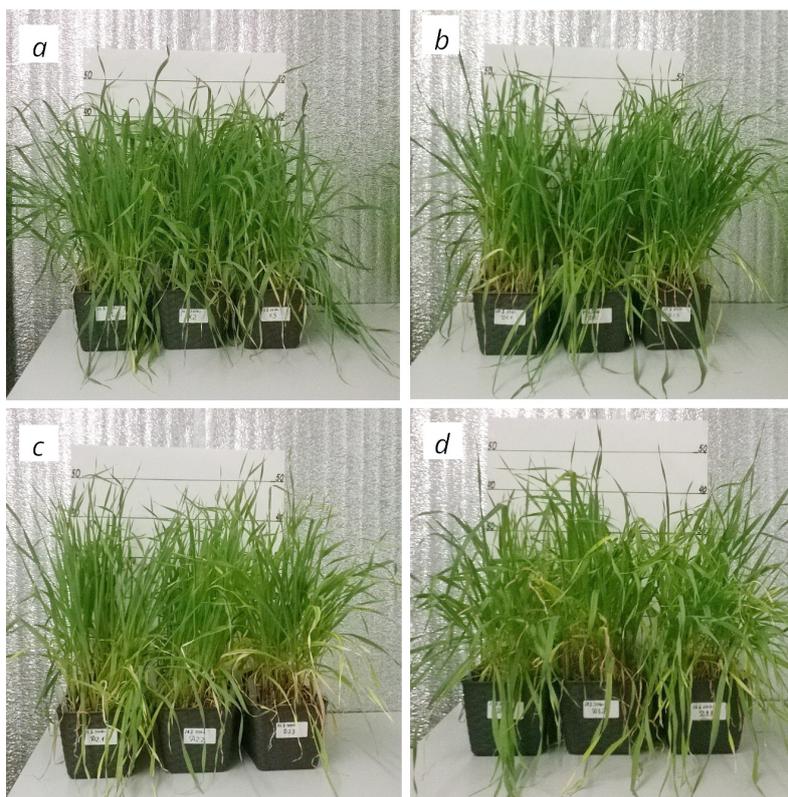


Рис. 1. Внешний вид растений ячменя при различных дозах обработки инокулянтом микорризообразующих грибов на момент окончания вегетационного опыта: *a* – контроль; *b* – 1 мг/50 семян; *c* – 7,5 мг/50 семян; *d* – 15 мг/50 семян

Fig. 1. Visual representation of barley plants at different doses of inoculation with mycorrhizal fungi at the end of the vegetation experiment: *a* – control; *b* – 1 mg/50 seeds; *c* – 7.5 mg/50 seeds; *d* – 15 mg/50 seeds

При анализе интенсивности микорризообразования использовались медиана, верхний и нижний квартили. При анализе биометрических показателей модельного растения и параметров накопления в нем ^{137}Cs применялись среднее арифметическое и стандартное отклонение, для оценки значимости различий с контролем – *t*-критерий Стьюдента. Решение о статистической значимости различий принималось при $p < 0,05$.

Результаты и их обсуждение. Применение инокулянта MycoApply SuperConcentrate способствовало развитию микорризной инфекции в корневой системе ячменя. При этом существенных отличий в ее встречаемости между вариантами опыта с различными дозами препарата не наблюдалось (табл. 1). Медианное значение интенсивности микорризной инфекции возрастало от 0 до 2,4 с увеличением дозы инокулянта от 0 до 7,5 мг на 50 семян. Однако дальнейшее увеличение дозы биологического препарата не приводило к росту интенсивности микорризной инфекции. Следует отметить, что продолжительность вегетационного опыта составила 37 сут, что может быть причиной недостаточно выраженных различий в степени микорризации корневой системы между различными вариантами эксперимента.

Таблица 1. Оценка встречаемости и интенсивности микорризной инфекции в корневой системе ячменя, %

Table 1. Assessment of the occurrence and intensity of mycorrhizal infection in the root system of barley, %

Доза инокулянта	Встречаемость	Интенсивность
Контроль	0,0 (0,0–0,2)	0,0 (0,0–0,1)
1 мг/50 семян	4,9 (3,2–6,1)	0,3 (0,0–0,8)
7,5 мг/50 семян	5,1 (3,0–7,1)	2,4 (0,3–4,9)
15 мг/50 семян	5,0 (3,2–7,3)	1,6 (0,2–2,4)

Примечание. Данные представлены в формате «медиана (нижний квартиль–верхний квартиль)».

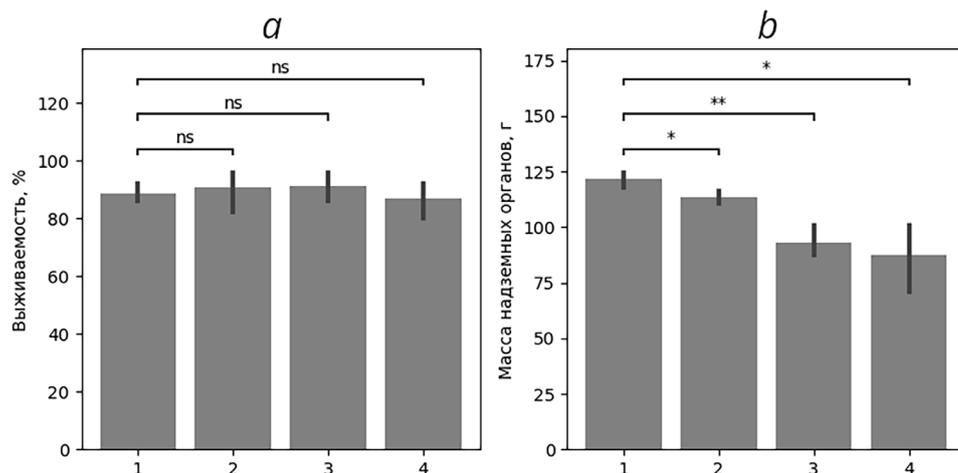


Рис. 2. Влияние дозы внесения инокулянта на выживаемость (а) и массу надземных органов (б) ячменя: 1 – контроль; 2 – доза 1 мг/50 семян; 3 – 7,5 мг/50 семян; 4 – 15 мг/50 семян; * – различия достоверны на уровне значимости 0,05; ** – различия достоверны на уровне значимости 0,01; ns — различия недостоверны

Fig. 2. Effects of inoculant dosage on barley survival (a) and aboveground biomass (b): 1 – control; 2 – dosage 1 mg/50 seeds; 3 – 7.5 mg/50 seeds; 4 – 15 mg/50 seeds; * – significant differences at the 0.05 level; ** – significant differences at the 0.01 level; ns – non-significant differences

Анализ биометрических показателей растений ячменя в различных вариантах опыта показал, что на фоне высокой обеспеченности растений фосфором, кальцием и магнием рекомендованная доза обработки почвы инокулянтам микоризообразующих грибов не вызывает достоверных изменений выживаемости (рис. 2, а), но несколько снижает массу надземных частей растений (рис. 2, б). Обработка семян ячменя повышенными дозами инокулянта микоризообразующих грибов (7,5 и 15 мг на 50 семян) приводит к существенному снижению массы надземных органов (на 23–28 %). Подобное явление можно объяснить тем, что при сверхоптимальной степени микоризации корневых систем значительная часть органических веществ, образуемых в процессе фотосинтеза, расходуется на рост и поддержание жизнедеятельности микоризообразующих грибов. При отсутствии заметного дефицита элементов минерального питания в почве (кроме калия) положительное влияние микоризы на растение нивелируется и межвидовые отношения из мутуалистических приобретают форму паразитических. Об этом свидетельствует и закономерное снижение концентрации калия в надземных органах ячменя: от 7,4 % в контроле (в пересчете на воздушно-сухой вес) до 6,2 % при максимальной дозе пропагул микоризообразующих грибов (хотя различия между контрольным и экспериментальным вариантом статистически недостоверны).

По имеющимся оценкам, микориза потребляет 10–20 % органического вещества, которое создает растение, взамен обеспечивает ему более благоприятные условия минерального питания. В работе S. E. Smith, D. J. Read [15] отмечается, что в мутуалистических отношениях растения с микоризообразующим грибом существует тонкий баланс между выгодой за счет улучшения минерального питания и потерями от затрат синтезированного органического вещества на поддержание жизнедеятельности гетеротрофного партнера. В большинстве случаев растение выигрывает от лучшей обеспеченности фосфором, который находится в почве в труднодоступном состоянии. Чем выше обеспеченность растения доступными формами макро- и микроэлементов, тем меньше выгода от микоризы.

Содержание ^{137}Cs в почвенном субстрате составляло 5,35–5,88 кБк/кг и несущественно отличалось между контейнерами. Однако накопление данного радионуклида в органах ячменя имело заметные различия между вариантами опыта (рис. 3). Наиболее высокое среднее содержание ^{137}Cs в подземных органах наблюдалось в контроле, достигая почти 5 кБк/кг. Во всех вариантах с обработкой микоризообразующими грибами средняя удельная активность радионуклида в подземных органах ячменя была на 27–37 % ниже. Однако ввиду высокой вариабельности данного показателя различия между вариантами статистически незначимы.

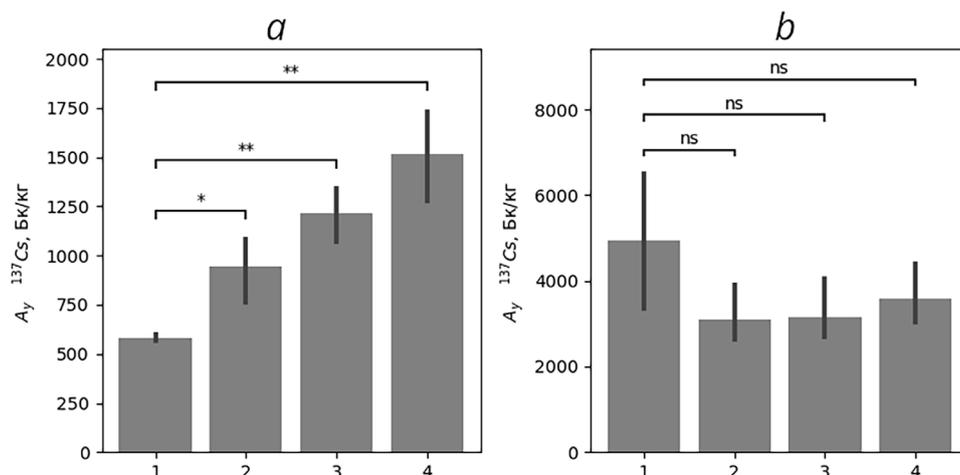


Рис. 3. Влияние дозы внесения инокулянта на удельную активность ¹³⁷Cs в надземных (а) и подземных (б) органах ячменя: 1 – контроль; 2 – доза 1 мг/50 семян; 3 – 7,5 мг/50 семян; 4 – 15 мг/50 семян; * – различия достоверны на уровне значимости 0,05; ** – различия достоверны на уровне значимости 0,01; ns – различия недостоверны

Fig. 3. Effect of inoculant dosage on the activity concentration of ¹³⁷Cs in aboveground (a) and underground (b) organs of barley: 1 – control; 2 – dosage 1 mg/50 seeds; 3 – 7.5 mg/50 seeds; 4 – 15 mg/50 seeds; * – significant differences at the 0.05 level; ** – significant differences at the 0.01 level; ns – non-significant differences

В отношении надземных органов ячменя прослеживалась четкая закономерность повышения удельной активности ¹³⁷Cs по мере увеличения дозы обработки микоризообразующим препаратом. Если в контроле данный показатель составлял $583,0 \pm 30,1$ Бк/кг, то уже при минимальной дозе он стал выше на 62 %, а при максимальной – разница с контролем составляла 160 %. Полученные результаты указывают на то, что внесение на поверхность почвы пропагул микоризообразующих грибов усиливает накопление ¹³⁷Cs чернобыльского происхождения в надземных органах ячменя.

K_n^{137Cs} надземными органами ячменя в микровегетационном эксперименте составил 0,101–0,267, а подземными – 0,569–0,886 (табл. 2). Микоризация корневых систем ячменя приводит к дозозависимому увеличению K_n^{137Cs} в надземных органах растения. В варианте с максимальной дозой обработки микоризообразующими грибами накопление ¹³⁷Cs происходит почти в 2,5 раза более интенсивно по сравнению с контролем. Однако в отношении подземных органов данная закономерность не сохраняется. Здесь максимальное значение K_n выявлено в контрольном варианте. Обработка пропагулами микоризообразующих грибов снижает накопление ¹³⁷Cs почти на 30 %, причем данный эффект не зависит от дозы.

Т а б л и ц а 2. Параметры накопления ¹³⁷Cs в надземных и подземных органах ячменя

Table 2. Indexes of ¹³⁷Cs accumulation in aboveground and underground organs of barley

Доза инокулянта	K_n , надземные органы	K_n , подземные органы	K_t	Вынос в надземные органы, %
Контроль	0,101 ± 0,021	0,886 ± 0,429	0,126 ± 0,043	0,21 ± 0,09
1 мг/50 семян	0,181 ± 0,022	0,600 ± 0,150	0,310 ± 0,057	0,35 ± 0,11
7,5 мг/50 семян	0,218 ± 0,028	0,569 ± 0,154	0,397 ± 0,098	0,35 ± 0,15
15 мг/50 семян	0,267 ± 0,067	0,617 ± 0,054	0,441 ± 0,141	0,41 ± 0,13

K_t радионуклида указывает на интенсивность его транспорта из корневой системы к побегам. Анализ полученных данных показал, что обработка семян ячменя пропагулами микоризообразующих грибов приводит к закономерному увеличению K_t от 0,126 в контроле до 0,441 в варианте с максимальной дозой. Полученные результаты свидетельствуют о том, что микоризация корневой системы стимулирует перенос ¹³⁷Cs от корневой системы к листовому аппарату, что приводит к существенному увеличению удельной активности радионуклида в последнем. При этом наблюдается тенденция к снижению уровня содержания радионуклида в подземных органах.

Вынос ^{137}Cs из почвенного субстрата в надземные органы ячменя в контрольном варианте составил 0,21 %. Рекомендуемая доза обработки препаратом микоризообразующих грибов приводит к увеличению данного показателя в 1,7 раз. Хотя максимальный вынос ^{137}Cs надземной фитомассой наблюдается в варианте с дозой внесения 15 мг/50 семян, разница с эффектом от дозы 1 мг/50 семян незначительна.

Анализ результатов данного исследования свидетельствует о том, что АМ является значимым фактором, регулирующим поступление RCs в растения. Поэтому углубление знаний о значении симбиотических микоризообразующих грибов в корневом поступлении техногенных радионуклидов и раскрытие механизмов данного явления позволит предложить новые подходы к реабилитации загрязненных территорий.

Долгоживущие RCs в случае радиационных аварий часто являются основными дозообразующими радионуклидами, ограничивающими нормальную жизнедеятельность на обширных территориях. Основным их депо в наземных экосистемах является почва. До настоящего времени отсутствуют экономически и экологически обоснованные технологии очищения почвы от RCs. В качестве одного из наиболее перспективных подходов рассматривается фитоэкстракция – накопление радионуклидов из почвы в надземных органах растений с последующей их безопасной утилизацией [16]. Однако относительный вынос RCs в фитомассу невелик и уменьшается с течением времени после радиоактивных выпадений. Усиление перехода ^{137}Cs и других радиоактивных изотопов в растения посредством развития в их корневой системе АМ может существенно повысить эффективность фитоэкстракции.

Полученный результат также важно учитывать при ведении растениеводства на почвах, загрязненных RCs. Использование микробных удобрений, в состав которых входят грибы, образующие АМ, может привести к существенному повышению содержания радионуклида в урожае.

Заключение. В условиях вегетационного опыта показано существенное усиление накопления радиоактивного изотопа ^{137}Cs надземными частями ячменя при увеличении интенсивности инфекции АМ в корневой системе растения. Микоризация корневой системы ячменя посевного посредством внесения на поверхность почвы инокулянта MusoApply SuperConcentrate в дозах от 2 до 30 мг/100 семян увеличивает K_n ^{137}Cs надземными вегетативными органами растения на 80–165 % относительно контроля. Интенсивность поглощения радионуклида надземными частями растения имеет прямую связь с дозой обработки инокулянтом. K_t ^{137}Cs и вынос радионуклида из почвы в надземные органы также значительно возрастают по мере увеличения дозы обработки инокулянтом.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке гранта БРФФИ Б16К-053.

Acknowledgements. The work was supported by grant BRFFR B16K-053.

Список использованных источников

1. Steiner, M. The role of fungi in the transfer and cycling of radionuclides in forest ecosystems / M. Steiner, I. Linkov, S. Yoshida // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2002. – Vol. 58. – N 2–3. – P. 217–241. [https://doi.org/10.1016/s0265-931x\(01\)00067-4](https://doi.org/10.1016/s0265-931x(01)00067-4)
2. Роль химии в реабилитации сельскохозяйственных угодий, подвергшихся радиоактивному загрязнению / Н. И. Санжарова, А. А. Сысоева, Н. Н. Исамов [и др.] // *Российский химический журнал*. – 2005. – Т. 49, № 3. – С. 26–34.
3. Ehlken, S. Environmental processes affecting plant root uptake of radioactive trace elements and variability of transfer factor data: a review / S. Ehlken, G. Kirchner // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2002. – Vol. 58, N 2–3. – P. 97–112. [https://doi.org/10.1016/s0265-931x\(01\)00060-1](https://doi.org/10.1016/s0265-931x(01)00060-1)
4. Лукьянова, Е. А. Микроорганизмы глубинных хранилищ жидких радиоактивных отходов и взаимодействие их с радионуклидами: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.00.07 / Лукьянова Евгения Александровна; Ин-т микробиологии Рос. акад. наук. – М., 2008. – 26 с.
5. Lloyd, J. Bioremediation of radioactive waste: radionuclide-microbe interactions in laboratory and field-scale studies / J. R. Lloyd, J. C. Renshaw // *Current Opinion in Biotechnology*. – 2005. – Vol. 16, N 3. – P. 254–260. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2005.04.012>
6. Keith-Roach, M. J. Chapter 13 Microbial interactions with radionuclides – summary and future perspectives / M. J. Keith-Roach, F. R. Livens // *Radioactivity in the Environment*. – 2002. – Vol. 2. – P. 383–390. [https://doi.org/10.1016/S1569-4860\(02\)80042-0](https://doi.org/10.1016/S1569-4860(02)80042-0)

7. Habte, M. Mycorrhizal fungi and plant nutrition / M. Habte // *Plant nutrient management in Hawaii's soils, approaches for tropical and subtropical agriculture* / eds.: J. Silva, R. Uchida. – Manoa, U.S.A., 2000. – P. 127–131.
8. Pal, S. Arbuscular mycorrhiza: Useful tool for heavy metal bioremediation / S. Pal // *International Journal of Agriculture, Environment and Biotechnology*. – 2011. – Vol. 4, N 4. – P. 379–399.
9. Zhu, Y. Uptake of Zn by arbuscular mycorrhizal white clover from Zn-contaminated soil / Y. Zhu, P. Christie, A. S. Laidlaw // *Chemosphere*. – 2001. – Vol. 42, N 2. – P. 193–199. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(00\)00125-9](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(00)00125-9)
10. Role of plants, mycorrhizae and phytochelators in heavy metal contaminated land remediation / A. G. Khan, C. Kuek, T. M. Chaudhry [et al.] // *Chemosphere*. – 2000. – Vol. 41, N 1–2. – P. 197–207. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(99\)00412-9](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(99)00412-9)
11. Potential of siderophore-producing bacteria for improving heavy metal phytoextraction / M. Rajkumar, N. Ae, M. Narasimha [et al.] // *Trends in Biotechnology*. – 2010. – Vol. 28, N 3. – P. 142–149. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2009.12.002>
12. Dubchak, S. The role of arbuscular mycorrhizal symbiosis in ¹³⁴Cs uptake by crop and wild plant species / S. Dubchak // *Environmental Sciences*. – 2015. – Vol. 8, N 1. – P. 175–184.
13. Clint, G. M. Uptake and accumulation of radiocaesium by mycorrhizal and non-mycorrhizal heather plants / G. M. Clint, J. Dighton // *New Phytologist*. – 1992. – Vol. 121, N 4. – P. 555–561. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1992.tb01125.x>
14. Trouvelot, A. Mesure du taux de mycorhization VA d'un systbme racinaire. Recherche de methodes d'estimation ayant une signification fonctionnelle / A. Trouvelot, J. L. Kough, V. Gianinazzi-Pearson // *Physiological and Genetical Aspects of Mycorrhizae* / ed. G. S. Gianinazzi-Pearson V. – Paris, 1986. – P. 217–221.
15. Smith, S. E. Mycorrhizal symbiosis / S. E. Smith, D. J. Read. – 2nd ed. – San Diego [et al.]: Academic Press, 1997. – 605 p.
16. Lasat, M. M. Potential for phytoextraction of ¹³⁷Cs from a contaminated soil / M. M. Lasat, W. Norvell, L. V. Kochian // *Plant and Soil*. – 1997. – Vol. 195, N 1. – P. 99–106. <https://doi.org/10.1023/A:1004210110855>

References

1. Steiner M., Linkov I., Yoshida S. The role of fungi in the transfer and cycling of radionuclides in forest ecosystems. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2002, vol. 58, no. 2–3, pp. 217–241. [https://doi.org/10.1016/S0265-931X\(01\)00067-4](https://doi.org/10.1016/S0265-931X(01)00067-4)
2. Sanzharova N. I., Sysoeva A. A., Isamov N. N., Aleksakhin R. M., Kuznetsov V. K., Zhigareva T. L. The role of chemistry in the rehabilitation of agricultural land exposed to radioactive contamination. *Rossiiskii khimicheskii zhurnal* [Russian Chemistry Journal], 2005, vol. 49, no. 3, pp. 26–34 (in Russian).
3. Ehlken S., Kirchner G. Environmental processes affecting plant root uptake of radioactive trace elements and variability of transfer factor data: a review. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2002, vol. 58, no. 2–3, pp. 97–112. [https://doi.org/10.1016/S0265-931X\(01\)00060-1](https://doi.org/10.1016/S0265-931X(01)00060-1)
4. Luk'yanova E. A. *Microorganisms of deep storage facilities for liquid radioactive waste and their interaction with radionuclides*. Abstract of Ph. D. diss. Moscow, 2008. 26 p. (in Russian).
5. Lloyd J. R., Renshaw J. C. Bioremediation of radioactive waste: radionuclide-microbe interactions in laboratory and field-scale studies. *Current Opinion in Biotechnology*, 2005, vol. 16, no. 3, pp. 254–260. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2005.04.012>
6. Keith-Roach M. J., Livens F. R. Chapter 13 Microbial interactions with radionuclides – summary and future perspectives. *Radioactivity in the Environment*, Elsevier, 2002, vol. 2, pp. 383–390. [https://doi.org/10.1016/S1569-4860\(02\)80042-0](https://doi.org/10.1016/S1569-4860(02)80042-0)
7. Habte M. Mycorrhizal fungi and plant nutrition. *Plant nutrient management in Hawaii's soils, approaches for tropical and subtropical agriculture*. Manoa, U.S.A., 2000, pp. 127–131.
8. Pal S. Arbuscular mycorrhiza: Useful tool for heavy metal bioremediation. *International Journal of Agriculture, Environment and Biotechnology*, 2011, vol. 4, no. 4, pp. 379–399.
9. Zhu Y., Christie P., Laidlaw A. S. Uptake of Zn by arbuscular mycorrhizal white clover from Zn-contaminated soil. *Chemosphere*, 2001, vol. 42, no. 2, pp. 193–199. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(00\)00125-9](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(00)00125-9)
10. Khan A. G., Kuek C., Chaudhry T. M., Khoo C. S., Hayes W. J. Role of plants, mycorrhizae and phytochelators in heavy metal contaminated land remediation. *Chemosphere*, 2000, vol. 41, no. 1–2, pp. 197–207. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(99\)00412-9](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(99)00412-9)
11. Rajkumar M., Ae N., Narasimha M., Prasad V., Freitas H. Potential of siderophore-producing bacteria for improving heavy metal phytoextraction. *Trends in Biotechnology*, 2010, vol. 28, no. 3, pp. 142–149. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2009.12.002>
12. Dubchak S. The role of arbuscular mycorrhizal symbiosis in ¹³⁴Cs uptake by crop and wild plant species. *Environmental Sciences*, 2015, vol. 8, no. 1, pp. 175–184.
13. Clint G., Dighton J. Uptake and accumulation of radiocaesium by mycorrhizal and non-mycorrhizal heather plants. *New Phytologist*, 1992, vol. 121, no. 4, pp. 555–561. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1992.tb01125.x>
14. Trouvelot A., Kough J. L., Gianinazzi-Pearson V. Mesure du taux de mycorhization VA d'un systbme racinaire. Recherche de methodes d'estimation ayant une signification fonctionnelle. *Physiological and Genetical Aspects of Mycorrhizae*. Paris, 1986, pp. 217–221.
15. Smith S. E., Read D. J. *Mycorrhizal symbiosis* (2nd ed.). San Diego, London, New York, Boston, Sydney, Tokyo, Toronto, Academic Press, 1997. 605 p.
16. Lasat M. M., Norvell W., Kochian L. V. Potential for phytoextraction of ¹³⁷Cs from a contaminated soil. *Plant and Soil*, 1997, vol. 195, no. 1, pp. 99–106. <https://doi.org/10.1023/A:1004210110855>

Информация об авторах

Никитин Александр Николаевич – канд. с/х наук, заместитель директора. Институт микробиологии НАН Беларуси (ул. Академика Купревича, 2, 220141, г. Минск, Республика Беларусь). <http://orcid.org/0000-0002-1369-0093>. E-mail: nikitinale@gmail.com

Шуранкова Ольга Александровна – науч. сотрудник. Институт радиобиологии НАН Беларуси (ул. Федюнинского, 4, 246007, г. Гомель, Республика Беларусь). <http://orcid.org/0000-0002-3311-6128>. E-mail: shurankova@list.ru

Танкевич Елена Александровна – науч. сотрудник. Институт радиобиологии НАН Беларуси (ул. Федюнинского, 4, 246007, г. Гомель, Республика Беларусь). <http://orcid.org/0009-0009-6443-4733>. E-mail: elena.karpova1991@mail.ru

Information about the authors

Aleksander N. Nikitin – Ph. D. (Agr.), Deputy Director. Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus (2, Academician Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). <http://orcid.org/0000-0002-1369-0093>. E-mail: nikitinale@gmail.com

Olga A. Shurankova – Researcher. Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus (4, Fedyuninski Str., 246007, Gomel, Republic of Belarus). <http://orcid.org/0000-0002-3311-6128>. E-mail: shurankova@list.ru

Elena A. Tankevich – Researcher. Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus (4, Fedyuninski Str., 246007, Gomel, Republic of Belarus). <http://orcid.org/0009-0009-6443-4733>. E-mail: elena.karpova1991@mail.ru

ISSN 1029-8940 (Print)

ISSN 2524-230X (Online)

УДК 599.735.31:[591.9+575.17.04](476)

<https://doi.org/10.29235/1029-8940-2025-70-1-40-47>

Поступила в редакцию 29.07.2024

Received 29.07.2024

А. А. Волнистый¹, К. В. Гомель¹, Г. В. Сергеев², М. Е. Никифоров¹

¹ Научно-практический центр НАН Беларуси по биоресурсам, Минск, Республика Беларусь

² Институт биоорганической химии НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

ГЕНЕТИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЗВОДИМОЙ ГРУППИРОВКИ ОЛЕНЕЙ И ОЦЕНКА ПОТОКА ГЕНОВ ИЗ НЕЕ В ПРИРОДНЫЕ ПОПУЛЯЦИИ

Аннотация. В исследовании приводятся результаты молекулярно-генетического анализа искусственной группировки оленей хозяйства «Сибирское подворье» на основании полиморфизма митохондриального контрольного региона и микросателлитных локусов ядерного генома, направленного на определение видовой принадлежности и происхождения, а также оценка наличия потока генов в дикую метапопуляцию благородного оленя *Cervus elaphus* посредством случайных побегов.

В результате проведенного молекулярно-генетического анализа определена принадлежность особей из искусственной популяционной группы оленей к виду *Cervus canadensis sibiricus*, или алтайский вапити. Полученные показатели генетического разнообразия в хозяйственной популяционной группе характеризовались как средние, типичные для популяций схожих размеров и состояния. Анализ митохондриальных последовательностей из белорусской метапопуляции благородного оленя ($n = 36$) не показал присутствия митохондриальных гаплотипов алтайского вапити. Также не было выявлено значительного потока генов из вольерной популяции оленей на ферме «Сибирское подворье». При этом обнаружены признаки одиночных событий гибридизации между благородными оленями и вапити, что требует повышенного внимания к разводимым в неволе близкородственным формам оленей в целях предотвращения гибридной интрогрессии адвентивных видов в дикую популяцию благородного оленя Беларуси.

Ключевые слова: благородный олень, алтайский вапити, гибридизация, поток генов

Для цитирования: Генетическая характеристика разводимой группировки оленей и оценка потока генов из нее в природные популяции / А. А. Волнистый, К. В. Гомель, Г. В. Сергеев, М. Е. Никифоров // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Сeryя біялагічных навук. – 2025. – Т. 70, № 1. – С. 40–47. <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2025-70-1-40-47>

Arseni A. Valnisty¹, Kanstantsin V. Homel¹, Gennady V. Sergeev², Mikhail E. Nikiforov¹

¹Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus on Bioresources, Minsk, Republic of Belarus

²Institute of Bioorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

GENETIC CHARACTERISTICS OF THE BRED GROUP OF DEER AND ASSESSMENT OF GENE FLOW FROM IT TO NATURAL POPULATIONS

Abstract. Here we present the results of genetic analysis of an artificial deer population, inhabiting an enclosed territory near Lida. The analysis was aimed at determining the precise origins and genetic characteristics of the population and discovering presence of any gene flow between the artificial population and the wild deer of the region. We employed mitochondrial control region haplotypes analysis to identify origins and possible matrilineal hybrids, and hybrid classification of migration analysis based on microsatellite data to discover hybrid specimens and gene flow, respectively. We have determined that the artificial population in question belongs to the species *Cervus canadensis sibiricus*, or Altai wapiti, originates in the South Altai region, and possesses mediocre genetic diversity as can be expected from a population of this size. While singular results of hybrid analysis seem to indicate a possibility of rare interbreeding between escaped wapiti and wild deer, there are no indicators of any substantial gene flow from the artificial population into the wild, but we believe that it still warrants additional attention in order to prevent undesirable introgression.

Keywords: game species, ungulates, hybridization, gene flow

For citation: Valnisty A. A., Homel K. V., Sergeev G. V., Nikiforov M. E. Genetic characteristics of the bred group of deer and assessment of gene flow from it to natural populations. *Vesti Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya biyalagichnykh navuk* = *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological series*, 2025, vol. 70, no. 1, pp. 40–47 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2025-70-1-40-47>

Введение. Парнокопытные (Artiodactyla) составляют большую часть населения крупных млекопитающих в природных местообитаниях Беларуси. Благородный олень (*Cervus elaphus*), европейская косуля (*Capreolus capreolus*) и европейский лось (*Alces alces*) относятся к значимым видам как для сохранения лесных экосистем, так и для охотничьего хозяйства Беларуси [1, 2].

К началу XX в. популяция благородного оленя резко сократилась. Длительная и кропотливая работа по восстановлению численности животных продолжалась вплоть до 2020-х гг. [3]. Параллельно с этим на территории Беларуси создавались коммерческие предприятия, на которых разводили животных адвентивных видов, в том числе и других оленьих (например, маралов). Алтайский вапити был завезен в Беларусь в 2016 г. для вольерного разведения в хозяйстве «Сибирское Подворье» в Лидском р-не Гродненской обл. Присутствие хозяйственной популяции на территории республики представляет определенный интерес в плане потенциального потока генов из искусственной популяции посредством побега особей. Это может иметь ряд последствий для экосистемы, в числе которых неконтролируемая инвазия и интрогрессивная гибридизация с дикой популяцией благородного оленя [4–6]. Настоящая работа посвящена изучению вольерной популяции алтайского вапити, определению ее происхождения, оценке генетических характеристик и выявлению потока генов из этой популяции в дикую среду.

Материалы и методы исследования. Эксперимент основывался на статистическом анализе варибельности длины микросателлитных фрагментов и нуклеотидных последовательностей митохондриального маркера контрольного региона в геномах обширной выборки благородного оленя, добытого на территории Беларуси, и оленей из искусственной популяции мараловодческой фермы «Сибирское подворье». Образцы тканей животных использовались для изоляции ДНК с последующей амплификацией микросателлитных локусов посредством мультиплексных реакций и автоматизированным определением размера полученных фрагментов, а также секвенированием митохондриальных нуклеотидных последовательностей. Данные митохондриального анализа затем применялись для определения происхождения популяций, а данные микросателлитного анализа – для определения характеристик генетического разнообразия и потока генов между популяциями.

В ходе исследования были сформированы экспериментальные выборки генетического материала оленей от индивидуальных особей: 169 образцов, включающих тестовую выборку в 10 образцов животных из вольерной популяции фермы «Сибирское подворье» и рабочую выборку в 159 образцов благородного оленя *Cervus elaphus*. Такого количества достаточно, чтобы выявить большинство возможных популяционных групп и определить гибридизацию между популяциями, представленными в выборках [7]. Материалом для выделения ДНК выступили ткани мышц и пантов. В анализ были включены как самцы, так и самки произвольного возраста. В выборку не входили особи из различных перекрывающихся поколений, собранные на одной локации. Образцы были добыты в период с 2018 по 2023 г. и депонированы в генетический банк Научно-практического центра НАН Беларуси по биоресурсам, где они сохранялись в криогенных условиях [8].

Подробные методики изоляции ДНК, амплификации микросателлитных локусов и митохондриального маркера указаны в [9] и [10] соответственно.

Определение матрилинейного происхождения особей по генетическим линиям на основе последовательностей митохондриального маркера осуществлялось по методам филогенетического анализа, подробно описанным ранее [10]. Миграционный анализ осуществлялся на основании данных полиморфизма микросателлитных фрагментов, сгруппированных по географическим популяционным группам. Для анализа использовался метод направленной генетической дифференциации, предложенный L. Sundqvist с соавт. [11], реализованный в виде набора функций `divMigrate` для пакета `diveRsity` [12] в R с использованием показателя Tajima's D. Для миграционного анализа применялась выборка особей смежных регионов с искусственной популяцией оленей с конечным размером в 73 особи.

Выявление гибридов на основании данных размеров микросателлитных фрагментов осуществлялось посредством программы `NewHybrids` [13] с параметрами использования априорных величин по умолчанию и 150 000 итераций Марковской цепи Монте-Карло (MCMC), с демеморализацией первых 50 000 итераций. При этом для анализа использовались только 7 микросателлитных локусов, продемонстрировавших наибольшую дифференциацию по параметру F_{st} (0,08–0,43, $p < 0,05$) между чистыми благородными оленями и животными из искусственной популяции оленей фермы «Сибирское подворье» согласно анализу молекулярной варибельности

в программе Arlequin 3.5 [14]; Haut14, T193, VM1818, T156, VM4208, IOBT965, TGLA57 [15]. В рамках выявления гибридизации особи из дикой популяции благородного оленя центрально-белорусской локализации ($n = 57$) и особи из исследуемой хозяйственной популяции оленей ($n = 10$) были априори обозначены как две чистые группы на основании результатов прошлых исследований [9, 10], тогда как анализируемая выборка составила 102 особи благородного оленя.

Результаты. Филогенетический анализ последовательностей митохондриального контрольного региона из выборки оленей фермы «Сибирское подворье» показал, что эти особи достоверно принадлежат одной кладе с особями *Cervus elaphus sibiricus* алтайского происхождения (KF879805, изолят ММ767 [16], Республика Алтай, окрестности р. Аргут) (рис. 1).

Cervus elaphus sibiricus (синоним – *Cervus canadensis sibiricus*) известен как марал, или алтайский вапити, – вид, значительно отличающийся от благородного оленя [17]. Все особи в исследованной вольерной популяции относятся именно к этому виду. А в дикой популяции благородного оленя в Беларуси признаки матрилинейной наследственности вапити отсутствуют.

Молекулярно-генетический анализ исследуемой популяционной группировки оленей (табл. 1) позволил охарактеризовать ее генетическое разнообразие как среднее по показателям аллельного богатства и наблюдаемой гетерозиготности, с типичным для популяции оленей уровнем инбридинга. При этом исследуемая искусственная популяция оленей не находится в состоянии, близком к равновесию по Харди-Вайнбергу, что закономерно для хозяйственной популяции вольерного режима содержания.

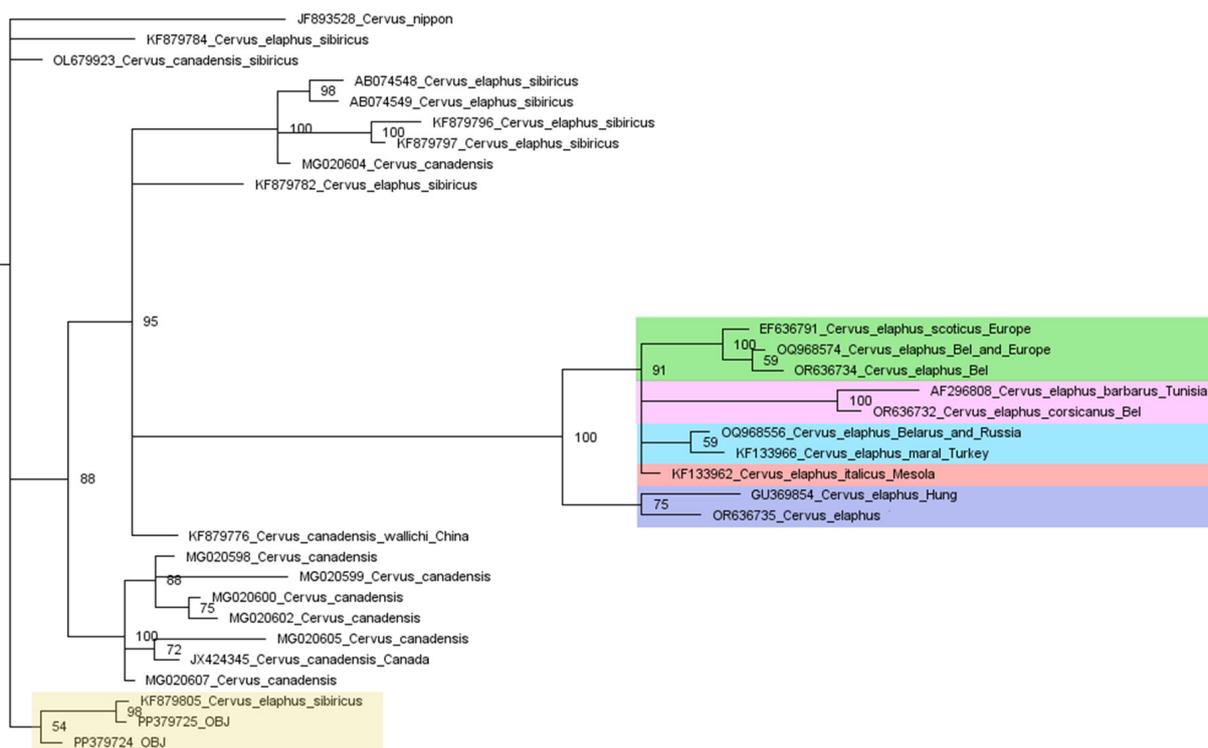


Рис. 1. Филогенетическое дерево последовательностей митохондриального контрольного региона *Cervus elaphus*, построенное по методу Байесовской вероятности с использованием модели Generalized Time-Reversible. Цветами выделены клады генетических линий благородного оленя (А – зеленый, В – розовый, С – синий, D – красный, E – бирюзовый) и клада исследуемой искусственной популяции (желтый). Последовательности обозначены по GenBank-идентификаторам. Последовательности особей из хозяйственной группировки – PP379725_OBJ и PP379724_OBJ

Fig. 1. Phylogenetic tree of sequences of the mitochondrial control region of *Cervus elaphus* constructed by the Bayesian probability method using the generalized time-reversible model. The colors indicate the clades of genetic lines of red deer (A – green, B – pink, C – blue, D – red, E – turquoise) and the clade of the studied artificial population (yellow). Sequences are designated by GenBank identifiers. Sequences of individuals from the economic group are designated as PP379725_OBJ and PP379724_OBJ

Таблица 1. Параметры генетического разнообразия в вольерной популяции оленей на ферме «Сибирское подворье», представленные по локусам

Table 1. Parameters of genetic diversity in the deer population of the Siberian Compound farm presented by loci

Локус	A	A _R	H _O	H _E	HWE	F _{IS}
Haut14	8	1,5	0,67	0,82	0,0895	0,224
T193	5	1,5	0,67	0,67	0,5086	0,000
BM1818	3	0,37	0,62	0,62	0,046	0,000
MM12	3	1,53	0,5	0,58	0,2519	0,160
T156	8	1,4	0,56	0,81	0,2953	0,446
T268	8	1,66	0,89	0,86	0,1189	-0,034
BM4208	5	1,66	0,89	0,71	0,4645	-0,202
IOBT965	5	1,63	0,6	0,74	0,048	0,233
T26	9	1,53	0,67	0,88	0,2434	0,313
Cer14	6	1,15	0,57	0,78	0,3012	0,368
T530	10	1,89	0,9	0,88	0,2815	-0,022
ETH152	2	1,26	0,44	0,35	0,3929	-0,205
Итого	74	1,36	0,52	0,62	0,0129	0,192

Примечание. A – число аллелей на локус; A_R – показатель аллельного богатства; H_O – наблюдаемая гетерозиготность; H_E – ожидаемая гетерозиготность; HWE – величина p для χ²-теста на соответствие групп равновесию по Харди-Вайнбергу; F_{IS} – коэффициент инбридинга по Райту. Жирным шрифтом выделены величины p < 0,05.

Миграционный анализ на основе данных полиморфизма микросателлитных фрагментов не указал на наличие выраженных потоков генов между искусственной группировкой и соседними дикими популяционными группами благородного оленя (рис. 2, табл. 2). Все показатели потенциального потока генов из популяции оленей хозяйства «Сибирское подворье» в соседние популяционные группировки благородного оленя не превышали уровня погрешности (<0,2).

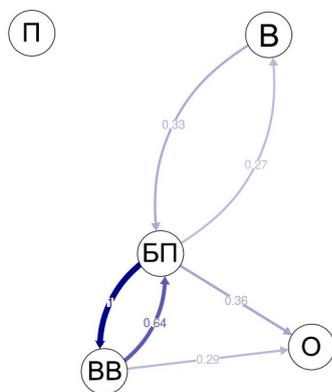


Рис. 2. Схематическое изображение относительной интенсивности миграционных потоков между условными географическими популяционными группами благородного оленя в Западной Беларуси и оленями с фермы «Сибирское подворье»: П – вольерная популяция; БП – Беловежская пушча; ВВ – Волковыск, О – Вилия-Островец, В – Воложин. Изображены потоки относительной интенсивности >0,25

Fig. 2. Schematic representation of the relative intensity of migration flows between conditional geographical population groups of red deer in Western Belarus and deer from the Siberian Compound farm (П – open-air population; БП – Belovezhskaya Pushcha; ВВ – Volkovysk, О – Viliya-Ostrovets, В – Volozhin). Flows of relative intensity >0.25 are depicted

Таблица 2. Показатели миграционных потоков между условными географическими популяционными группами благородного оленя в Западной Беларуси и оленями с фермы «Сибирское подворье»

Table 2. Indicators of migration flows between conditional geographical population groups of red deer in Western Belarus and deer from the Siberian Compound farm

Источник	Принимающая популяция	Воложин	Вилия-Островец	Беловежская пушча	Волковыск	Ферма «Сибирское подворье»
Воложин	–	–	0,169	0,33	0,232	0,108
Вилия-Островец	–	0,106	–	0,235	0,152	0,14
Беловежская пушча	–	0,273	0,357	–	1	0,123
Волковыск	–	0,152	0,288	0,645	–	0,126
Ферма «Сибирское подворье»	–	0,13	0,159	0,208	0,137	–

Примечание. Жирным шрифтом выделены потоки относительной интенсивности >0,25.

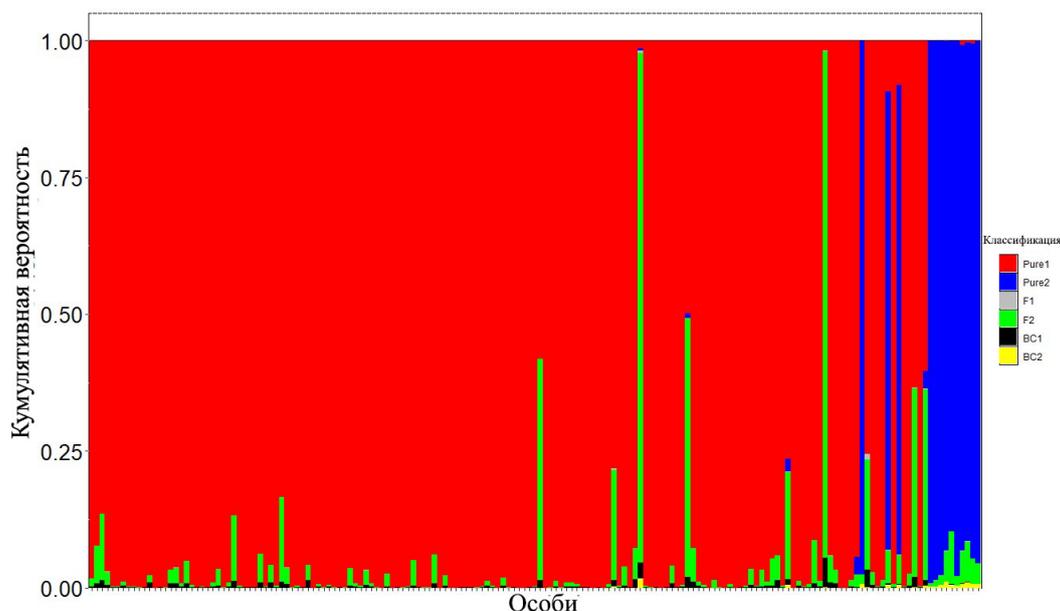


Рис. 3. График кумулятивных вероятностей индивидуальной принадлежности особей в белорусской метапопуляции благородного оленя и фермерских оленей к гибридным классам (каждый вертикальный столбик – индивидуальная особь из выборки). Цветовое заполнение обозначает кумулятивную вероятность принадлежности особи к гибриднему классу: красный и синий – вероятности принадлежности к чистым оленям и алтайским вапиту соответственно; серый – к гибридам F1; зеленый – к гибридам F2; черный – к F1-бэкрросным гибридам с благородным оленем; желтый – к F1-бэкрросным гибридам с алтайским вапиту

Fig. 3. Graph of cumulative probabilities of individual belonging of individuals in the Belarusian metapopulation of red deer and farm deer to hybrid classes (each vertical bar is an individual from the sample). Color filling indicates the cumulative probability of an individual belonging to a hybrid class: red and blue - the probability of belonging to pure deer and Altai wapiti, respectively; gray – for F1 hybrids; green – for F2 hybrids; black – for F1 backcross hybrids with red deer; yellow – to F1-backcross hybrids with Altai elk

Анализ микросателлитных данных исследуемых свободноживущих популяций (рис. 3) показал достоверную классификацию абсолютного большинства (>95 %) диких особей благородного оленя как чистых относительно центрально-белорусской контрольной группы. Исключение – пять особей: две особи (ТН00900 – западно-белорусской локализации, ТН02545 – северно-белорусской локализации) продемонстрировали высоковероятные (>90 %) признаки гибридов второго поколения между двумя контрольными популяциями; три особи – признаки чистых особей хозяйственной группировки с вероятностью от 83 до 92 %.

Заключение. В результате проведенной работы получены данные о видовой принадлежности и происхождении искусственной популяции оленей с фермы «Сибирское подворье»: животные относятся к виду алтайских вапиту *Cervus canadensis sibiricus* и наиболее близки по последовательности митохондриального маркера контрольного региона к популяции с юга Республики Алтай. Следовательно, эта группировка филогенетически достоверно не относится к известному подвиду благородного оленя *Cervus elaphus maral*, распространенному на Ближнем Востоке, Кавказе и на территории Воронежского заповедника, которого в разговорной речи также называют маралом.

Обнаружение свойственных вапиту гаплотипов митохондриального контрольного региона у диких особей благородного оленя могло бы явиться неопровержимым доказательством наличия гибридизации, однако анализ контрольного региона не выявил ни одного подобного примера в выборке в 36 особей. Тем не менее, учитывая то, что митохондриальная наследственность строго матрилинейна [18], и то, что хозяйственная популяция оленей преимущественно состоит из самцов, разводимых на панты, выявить митохондриальные гаплотипы вапиту среди дикой популяции благородного оленя возможно только при наличии ярко выраженного потока генов в дикую среду, который осуществляется в том числе и особями женского пола.

Средние показатели генетического разнообразия, демонстрируемые искусственной группировкой оленей с фермы «Сибирское подворье», согласно микросателлитным данным, соответствуют таковым для хозяйственных популяций сравнимых размеров.

Большой интерес вызывают результаты миграционного анализа и выявления гибридов. Обнаружение в исследуемой выборке благородных оленей двух особей, отнесенных к гибридам второго поколения между хозяйственными вапиту и диким оленем, а также трех особей с генетическими признаками алтайских вапиту указывает на возможность побегов животных из искусственной популяции с последующей гибридизацией с дикими особями благородного оленя в природных условиях. Однако эти результаты следует рассматривать в контексте географии выборки и результатов митохондриального анализа.

Три особи благородного оленя, классифицированные анализом гибридизации как чистые алтайские вапиту (ТН02454, Genbank A/N OR636734, ТН02860, ТН2862), были добыты на территориях Чериковского р-на Могилевской обл. и Верхнедвинского р-на Витебской обл. соответственно, что более чем в 400 км от границы фермы «Сибирское подворье». Одна из предположительных гибридных особей (ТН02545, Genbank A/N OR636735) также имеет верхнедвинскую локализацию. Эти четыре особи были обнаружены на расстоянии от предполагаемого источника, которое значительно превосходит типичную способность видов рода *Cervus* к дисперсии, особенно при условии миграции по множественным фрагментированным природным зонам через обширные антропогенные территории [19]. Только одна из предположительных гибридных особей (ТН00900, Genbank A/N OQ968570) была добыта в радиусе менее 100 км от ареала популяции хозяйства «Сибирское подворье».

Помимо географического фактора, значительными являются данные анализа митохондриальных последовательностей. Для трех из вышеперечисленных особей есть результаты анализа последовательностей митохондриальной ДНК (мтДНК), выполненного в рамках прошлых работ, однозначно относящие три из упомянутых особей к виду *Cervus elaphus* и его генетическим линиям А (особи ТН00900, ТН02454) и Е (особь ТН02545) [10]. Также показательны результаты миграционного анализа, не выявляющие достоверных признаков интенсивного потока генов из хозяйственной популяции фермы «Сибирское подворье». С учетом этих факторов наиболее вероятным объяснением является принадлежность особей ТН02454, ТН02545, ТН02860 и ТН02862 к гибридам с иными вапитоидными линиями *Cervus* неизвестного происхождения, например, пятнистым оленем *Cervus nippon*. Тем не менее показатели особи ТН00900 характеризуют ограниченные случаи гибридизации между хозяйственной и дикой популяцией оленей как возможные.

Суммарно популяция оленей с фермы «Сибирское подворье», установленная как принадлежащая к виду *Cervus canadensis sibiricus*, характеризуется средними показателями генетического разнообразия и на данный момент не является источником интенсивного потока генов алтайских вапиту в дикую популяцию благородного оленя в Беларуси. При этом случаи побега особей и последующей гибридизации с дикими особями благородного оленя остаются вероятным риском и требуют дополнительного внимания для предотвращения неконтролируемой гибридной трансформации существующей популяции, прошедшей недавнее восстановление.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список использованных источников

1. Романов, В. С. Благородный олень (*Cervus E. elaphus*) в Беларуси и основные принципы программы по его дальнейшей реакклиматизации / В. С. Романов, П. Г. Козло // Труды Белорусского государственного технологического университета. Сер. Лесное хозяйство. – 2002, № 1. – С. 30–42.
2. Шакун, В. В. Млекопитающие Беларуси / В. В. Шакун. – Минск: Беларусь, 2022. – 248 с.
3. Шакун, В. В. Особенности формирования популяций благородного оленя в Беларуси и факторы, их обуславливающие / В. В. Шакун. – Минск: [б. и.], 2011. – 24 с.
4. Introgression Through Rare Hybridization: A Genetic Study of a Hybrid Zone Between Red and Sika Deer (*Genus Cervus*) in Argyll, Scotland / S. J. Goodman, N. H. Barton, G. Swanson [et al.] // Genetics. – 1999. – Vol. 152, N 1. – P. 355–371. <https://doi.org/10.1093/genetics/152.1.355>
5. Gilman, R. T. Hybridization, species collapse, and species reemergence after disturbance to premating mechanisms of reproductive isolation / R. T. Gilman, J. E. Behm // Evolution. – 2011. – Vol. 65, N 9. – P. 2592–2605. <https://doi.org/10.1111/j.1558-5646.2011.01320.x>

6. Cryptic Biological Invasions: a General Model of Hybridization / C. S. Quilodrán, F. Austerlitz, M. Currat, J. I. Montoya-Burgos // *Scientific Reports*. – 2018. – Vol. 8, N 1. – P. 2414. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-20543-6>
7. Hale, M. L. Sampling for microsatellite-based population genetic studies: 25 to 30 individuals per population is enough to accurately estimate allele frequencies / M. L. Hale, T. M. Burg, T. E. Steeves // *PLoS One*. – 2012. – T. 7, N 9. – P. e45170. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0045170>
8. Коллекция Генетического банка дикой фауны ГНПО «НПЦ НАН Беларуси по биоресурсам» – подходы к формированию и практика использования коллекционных материалов для генетических исследований / А. А. Волнистый, А. А. Семенова, В. О. Молчан [и др.] // Всероссийская конференции «Зоологические коллекции как источник генетических ресурсов мировой фауны – классические и современные подходы к их изучению, хранению и использованию»: программа, тез. докл. и постерных сообщений, 22–23 июня 2022 г., Санкт-Петербург / Зоол. ин-т РАН. – СПб., 2022. – С. 15.
9. Reintroduction shapes the genetic structure of the red deer (*Cervus elaphus*) population in Belarus / A. A. Valnisty, K. V. Homel, E. E. Kheidorova [et al.] // *Theriologia Ukrainica*. – 2022. – Vol. 2022, N 23. – С. 31–46. <http://doi.org/10.15407/tu2306>
10. Between the lines: mitochondrial lineages in the heavily managed red deer population of Belarus / A. A. Valnisty, K. V. Homel, E. E. Kheidorova [et al.] // *Mammalian Biology*. – 2024. – Vol. 104, № 2. – P. 205–214. <https://doi.org/10.1007/s42991-023-00397-w>
11. Directional genetic differentiation and relative migration / L. Sundqvist, K. Keenan, M. Zackrisson [et al.] // *Ecology and Evolution*. – 2016. – Vol. 6, N 11. – P. 3461–3475. <https://doi.org/10.1002/ece3.2096>
12. diveRsiTy: An R package for the estimation and exploration of population genetics parameters and their associated errors / K. Keenan, P. McGinnity, T. F. Cross [et al.] // *Methods in Ecology and Evolution*. – 2013. – Vol. 4, N 8. – P. 782–788. <https://doi.org/10.1111/2041-210x.12067>
13. Anderson, E. C. A Model-Based Method for Identifying Species Hybrids Using Multilocus Genetic Data / E. C. Anderson, E. A. Thompson // *Genetics*. – 2002. – Vol. 160, N 3. – P. 1217–1229. <https://doi.org/10.1093/genetics/160.3.1217>
14. Excoffier, L. Arlequin suite ver 3.5: a new series of programs to perform population genetics analyses under Linux and Windows / L. Excoffier, H. E. L. Lischer // *Molecular Ecology Resources*. – 2010. – Vol. 10, N 3. – P. 564–567. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0998.2010.02847.x>
15. Волнистый, А. А. Разработка панели микросателлитных маркеров для мультиплексного генотипирования белорусских популяций благородного оленя (*Cervus elaphus* L.) / А. А. Волнистый // Структура и динамика биоразнообразия: материалы I Респ. заоч. науч.-практ. конф. молодых ученых, Минск, 23 дек. 2019 г. / Белорус. гос. ун-т; редкол.: С. В. Буга (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2019. – С. 260–263.
16. Late-glacial recolonization and phylogeography of European red deer (*Cervus elaphus* L.) / M. Meiri, A. M. Lister, T. F. G. Higham [et al.] // *Molecular Ecology*. – 2013. – Vol. 22, N 18. – P. 4711–4722. <https://doi.org/10.1111/mec.12420>
17. Phylogeny and evolution of the genus *Cervus* (Cervidae, Mammalia) as revealed by complete mitochondrial genomes / P. Mackiewicz, M. Matusiuk, M. Świsłocka [et al.] // *Scientific Reports*. – 2022. – Vol. 12, N 1. – Art. 16381. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-20763-x>
18. Boore, J. L. Animal mitochondrial genomes / J. L. Boore // *Nucleic Acids Research*. – 1999. – Vol. 27, N 8. – P. 1767–1780. <https://doi.org/10.1093/nar/27.8.1767>
19. How far to go? Determinants of migration distance in land mammals / C.S. Teitelbaum, W. F. Fagan, C. H. Fleming [et al.] // *Ecology Letters*. – 2015. – Vol. 18, N 6. – P. 545–552. <https://doi.org/10.1111/ele.12435>

References

1. Romanov V. S, Kozlo P. G. Red deer (*Cervus e. elaphus*) in Belarus and the main principles of it's continued reacclimatization. *Trudy Belorusskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya Lesnoe khozyaistvo* [Proceedings of the Belarusian State Technological University. Forestry Series], 2002, no. 10, pp. 30–42 (in Russian).
2. Shakun, V. V. *Mammals of Belarus*, Minsk, Belarus' Publ., 2022. 248 p. (in Russian).
3. Shakun, V. V. *Peculiarities of the formation of red deer populations in Belarus and the factors causing them*. Minsk, 2011, 24 p. (in Russian).
4. Goodman S. J., Barton N. H., Swanson G., Abernethy K., Pemberton J. M. Introgression through rare hybridization: A genetic study of a hybrid zone between red and sika deer (*Genus Cervus*) in Argyll, Scotland. *Genetics*, 1999, vol. 152, no. 1, pp. 355–371. <https://doi.org/10.1093/genetics/152.1.355>
5. Gilman R. T., Behm J. E. Hybridization, species collapse, and species reemergence after disturbance to pre-mating mechanisms of reproductive isolation. *Evolution*, 2011, vol. 65, no. 9, pp. 2592–2605. <https://doi.org/10.1111/j.1558-5646.2011.01320.x>
6. Quilodrán C. S., Austerlitz F., Currat M., Montoya-Burgos J. I. Cryptic biological invasions: A general model of hybridization. *Scientific Reports*, 2018, vol. 8, no. 1, p. 2414. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-20543-6>
7. Hale M. L., Burg T. M., Steeves T. E. Sampling for microsatellite-based population genetic studies: 25 to 30 individuals per population is enough to accurately estimate allele frequencies. *PLoS ONE*, 2012, vol. 7, no. 9, p. e45170. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0045170>
8. Valnisty A. A., Semenova A. A., Molchan V. O., Homel K. V., Kheidorova E. E., Shpak A. V., Slivinska K., Lobanovskaya P. Yu., Nikiforov M. E. Collection of the Genetic Bank of Wild Fauna of the State Scientific and Production Center for Bioresources of the National Academy of Sciences of Belarus – approaches to formation and practice of using collection materials for genetic research. *Vserossiiskaya konferentsiya "Zoologicheskie kollektzii kak istochnik geneticheskikh*

resursov mirovoi fauny – klassicheskie i sovremennye podkhody k ikh izucheniyu, khranenyu i ispol'zovaniyu”: programma, tezyisy dokladov i posternykh soobshchenii, 22–23 iyunya 2022 goda, Sankt-Peterburg [All-Russian Conference “Zoological Collections as a Source of Genetic Resources of the World Fauna – Classical and Modern Approaches to Their Study, Storage and Use”: program, abstracts of reports and poster presentations, June 22–23, 2022, St. Petersburg]. St. Petersburg, 2022, p. 15 (in Russian).

9. Valnisty A. A., Homel K. V., Kheidorova E. E., Nikiforov M. Y., Molchan V. O., Lobanovskaya P. Y., Semionova A. A. Reintroduction shapes the genetic structure of the red deer (*Cervus elaphus*) population in Belarus. *Theriologia Ukrainica*, 2022, vol. 2022, no. 23, pp. 31–46. <http://doi.org/10.15407/tu2306>

10. Valnisty A. A., Homel K. V., Kheidorova E. E., Molchan V. O., Nikiforov M. Y. Between the lines: Mitochondrial lineages in the heavily managed red deer population of Belarus. *Mammalian Biology*, 2024, vol. 104, no. 2, pp. 205–214. <https://doi.org/10.1007/s42991-023-00397-w>

11. Sundqvist L., Keenan K., Zackrisson M., Prodöhl P., Kleinhaus D. Directional genetic differentiation and relative migration. *Ecology and Evolution*, 2016, vol. 6, no. 11, pp. 3461–3475. <https://doi.org/10.1002/ece3.2096>

12. Keenan K., McGinnity P., Cross T. F., Crozier W. W., Prodöhl P. A. diveRsity: An R package for the estimation and exploration of population genetics parameters and their associated errors. *Methods in Ecology and Evolution*, 2013, vol. 4, no. 8, pp. 782–788. <https://doi.org/10.1111/2041-210x.12067>

13. Anderson E. C., Thompson E. A. A model-based method for identifying species hybrids using multilocus genetic data. *Genetics*, 2002, vol. 160, no. 3, pp. 1217–1229. <https://doi.org/10.1093/genetics/160.3.1217>

14. Excoffier L., Lischer H. E. L. Arlequin suite ver 3.5: a new series of programs to perform population genetics analyses under Linux and Windows. *Molecular Ecology Resources*, 2010, vol. 10, no. 3, pp. 564–567. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0998.2010.02847.x>

15. Valnisty A. A. Development of a panel of microsatellite markers for multiplex genotyping of Belarusian populations of red deer (*Cervus elaphus* L.). *Struktura i dinamika bioraznobraziya: materialy I Respublikanskoi zaochnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchenykh, Minsk, 23 dekabrnya 2019 goda* [Structure and dynamics of biodiversity: Proceedings of the I Republican correspondence scientific and practical conference of young scientists, Minsk, December 23, 2019]. Minsk, 2019, pp. 260–263 (in Russian).

16. Meiri M., Lister A. M., Higham T. F. G., Stewart J. R., Straus L. G., Obermaier H., González Morales M. R., Marín-Arroyo A. B., Barnes I. Late-glacial recolonization and phylogeography of European red deer (*Cervus elaphus* L.). *Molecular Ecology*, 2013, vol. 22, no. 18, pp. 4711–4722. <https://doi.org/10.1111/mec.12420>

17. Mackiewicz P., Matusiuk M., Świsłocka M., Zachos F. E., Hajji G. M., Saveljev A. P., Seryodkin I. V., Farahvash T., Rezaei H. R., Torshizi R. V., Mattioli S., Ratkiewicz M. Phylogeny and evolution of the genus *Cervus* (Cervidae, Mammalia) as revealed by complete mitochondrial genomes. *Scientific Reports*, 2022, vol. 12, no. 1, art. 16381. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-20763-x>

18. Boore J. L. Animal mitochondrial genomes. *Nucleic Acids Research*, 1999, vol. 27, no. 8, pp. 1767–1780. <https://doi.org/10.1093/nar/27.8.1767>

19. Teitelbaum C. S., Fagan W. F., Fleming C. H., Dressler G., Calabrese J. M., Leimgruber P., Mueller T. How far to go? Determinants of migration distance in land mammals. *Ecology Letters*, 2015, vol. 18, no. 6, pp. 545–552. <https://doi.org/10.1111/ele.12435>

Информация об авторах

Волнистый Арсений Андреевич – научный сотрудник. Научно-практический центр НАН Беларуси по биоресурсам (ул. Академическая, 27, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: volnisty.aa@yandex.ru

Сергеев Геннадий Валерьевич – канд. хим. наук, заведующий лабораторией. Институт биоорганической химии НАН Беларуси (ул. Академика Купревича, 5/2, 220141, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: gvserg@iboch.by

Гомель Константин Вячеславович – канд. биол. наук, вед. науч. сотрудник. Научно-практический центр НАН Беларуси по биоресурсам (ул. Академическая, 27, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: homelkv@gmail.com

Никифоров Михаил Ефимович – академик, д-р биол. наук, профессор, заведующий лабораторией. Научно-практический центр НАН Беларуси по биоресурсам (ул. Академическая, 27, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: nikif@tut.by

Information about the authors

Arseni A. Valnisty – Researcher. Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus on Bioresources (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: volnisty.aa@yandex.ru

Gennady V. Sergeev – Ph. D. (Chem.), Head of Laboratory. Institute of Bioorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (5/2, Academician Kuprevich Str., Minsk, Republic of Belarus). E-mail: gvserg@iboch.by

Kanstantsin V. Homel – Ph. D. (Biol.), Leading Researcher. Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus on Bioresources (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: homelkv@gmail.com

Mikhail E. Nikiforov – Academician, D. Sc. (Biol.), Head of the Laboratory. Scientific and Practical Centre of the National Academy of Sciences of Belarus on Bioresources (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nikif@tut.by

ISSN 1029-8940 (Print)
ISSN 2524-230X (Online)
УДК 574.32+ 57.033
<https://doi.org/10.29235/1029-8940-2025-70-1-48-54>

Поступила в редакцию 20.11.2024
Received 20.11.2024

В. В. Демянчик

Полесский аграрно-экологический институт НАН Беларуси, Брест, Республика Беларусь

ПУТИ ФОРМИРОВАНИЯ СИНАНТРОПНОГО НАСЕЛЕНИЯ ПОЗВОНОЧНЫХ *TETRAPODA* СЕЛИТЕБНЫХ ТЕРРИТОРИЙ В УСЛОВИЯХ ЮГО-ЗАПАДА БЕЛАРУСИ

Аннотация. Цель работы – определить основные пути формирования синантропного населения позвоночных *Tetrapoda* селитебных территорий в условиях юго-запада Беларуси.

Обобщены результаты оригинальных исследований и литературных данных по структуре и динамике населения позвоночных *Tetrapoda* на землях населенных пунктов и сопредельных территориях юго-западной части Беларуси (Брестская область). Рассматриваются экологические особенности появления регионально новых видов. Установлены основные пути формирования синантропного населения *Tetrapoda* селитебных территорий: географический, ландшафтный, стациональный (экологический), экзантропный. В течение последнего десятилетия на селитебных территориях севера Брестской области отмечалось 5-кратное, по сравнению с юго-западом региона, увеличение числа новых видов синантропного экологического комплекса тетрапод.

Ключевые слова: синантропный комплекс, тетраподы, селитебные территории, юго-запад Беларуси

Для цитирования: Демянчик, В. В. Пути формирования синантропного населения позвоночных *Tetrapoda* селитебных территорий в условиях юго-запада Беларуси / В. В. Демянчик // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Сэрыя біялагічных навук. – 2025. – Т. 70, № 1. – С. 48–54. <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2025-70-1-48-54>

Victor. V. Demyanchik

Polesie Agrarian Ecological Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Brest, Republic of Belarus

WAYS OF FORMATION OF SYNANTHROPIC POPULATION OF *TETRAPODA* VERTEBRATES IN RESIDENTIAL TERRITORIES IN THE CONDITIONS OF SOUTH-WEST BELARUS

Abstract. The aim of the article is to determine the main ways of formation of the synanthropic population of *Tetrapoda* in residential areas in the south-west Belarus based on our research results and literature data.

The results of studies on the structure and dynamics of the population of *Tetrapoda* on the lands of settlements and adjacent territories of the south-west part of Belarus (Brest region) are summarized. Ecological features of the emergence of regionally new species are considered. The main ways of formation of the synanthropic population of *Tetrapoda* (geographical, landscape, stationary (ecotopic), exanthropic) in residential areas are determined. Over the last decade, a five-fold increase in the number of new species of the synanthropic ecological complex of *Tetrapoda* has been observed in residential areas in the north of the Brest region compared to the south-west of this region.

Keywords: synanthropic complex, *Tetrapoda*, residential areas, south-west of Belarus

For citation: Demyanchik V. V. Ways of formation of synanthropic population of *Tetrapoda* vertebrates in residential territories in the conditions of south-west Belarus. *Vesti Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya biyalagichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological series*, 2025, vol. 70, no. 1, pp. 48–54 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2025-70-1-48-54>

Введение. Земли населенных пунктов (селитебные территории), как и природные территории, являются местами обитания или временного пребывания десятков видов позвоночных животных. Учитывая возросшие темпы роста и развития средних и крупных городов и обратный процесс угазания сельских населенных пунктов Беларуси (особенно на современном этапе), а также отсутствие полноценного анализа последствий происходящего для фауны селитебных территорий и антропогенного ландшафта в целом, актуальность комплексной аналитической работы такого плана очевидна.

Изучение популяций и сообществ позвоночных животных в различных типах экосистем, в том числе и на селитебных территориях, является неотъемлемой составляющей эколого-фаунистических исследований и мониторинга окружающей среды. Как показывает анализ топографических материалов и геоинформационных систем, в последние десятилетия существенно изменилось соотношение площадей сельских и городских населенных пунктов, сократилось общее

число малых населенных пунктов и преобразились ландшафтная и архитектурно-техническая среда. При этом комплексная оценка стадиальной структуры и изменений состава таксономических групп тетрапод позвоночных животных селитебных местообитаний в разрезе крупного региона Беларуси за длительный период не проводилась. Также в имеющихся публикациях недостаточно полно отражены хронология и особенности появления многих регионально новых видов и популяционных группировок. В то время как такие данные являются необходимой основой для прогнозирования изменений, происходящих в популяциях диких животных, как одного из существенных элементов устойчивого состояния и функционирования экологической среды, способствующей благоприятному социально-экономическому развитию населенных пунктов и в значительной мере определяющей качество жизни людей.

Исходя из ландшафтно-географических и территориально-экологических особенностей, а также из степени изученности фауны и наличия значительного объема опубликованных данных за предшествующий период, можно заключить, что территория Брестской области является перспективным регионом для проведения анализа, в том числе и ретроспективной оценки путей формирования структуры и изменения состава позвоночных животных селитебных местообитаний на протяжении длительного отрезка времени.

Следует подчеркнуть, что вопросы особенностей и путей формирования синантропного населения позвоночных животных на уровне видов и популяций в Беларуси до настоящего времени изучены недостаточно, хотя в сопредельных регионах проводились исследования формирования видового состава тетрапод населенных пунктов на примере сезонных изменений орнитофауны [1–3].

Цель работы – на основании результатов оригинальных исследований и данных литературы определить основные пути формирования синантропного населения позвоночных животных *Tetrapoda* селитебных территорий в условиях юго-запада Беларуси.

Материалы и методы исследования. Материалом исследований стали результаты регулярных учетов видового состава и численности тетрапод, которые были проведены в 2010–2023 гг. на стационарах городов Брест (2 стационара), Пинск, Ивацевичи и 8 сельских населенных пунктов (н. п.) Брестской области, а также данные, полученные в ходе эпизодических обследований фауны тетрапод населенных пунктов во всех административных районах юго-запада Беларуси (рис. 1).

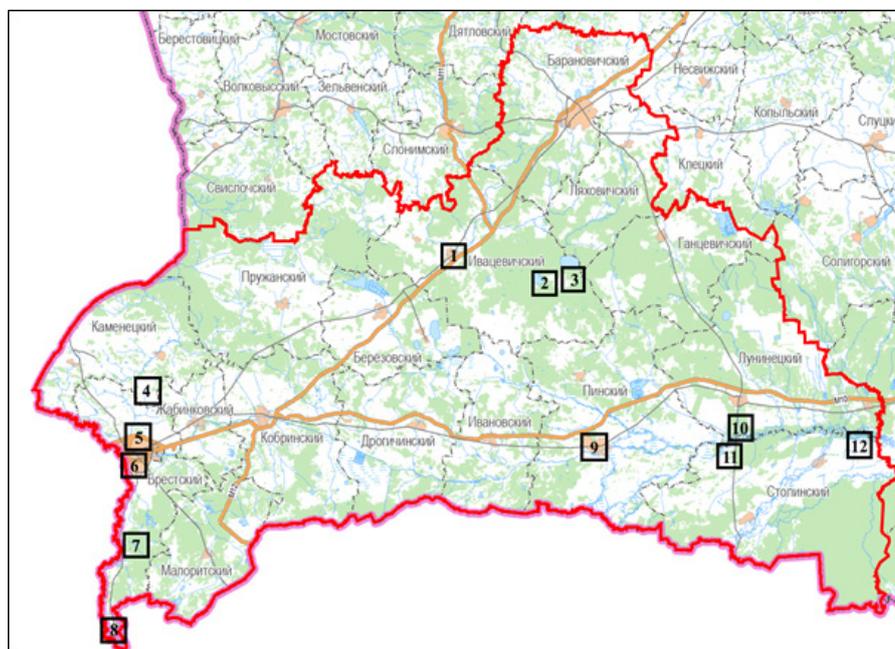


Рис. 1. Расположение стационаров исследований: 1 – г. Ивацевичи, 2 – н. п. Бобровичи, 3 – н. п. Выгоношчи, 4 – н. п. Турна Большая, 5, 6 – г. Брест, 7 – н. п. Белое озеро, 8 – н. п. Томашовка, 9 – г. Пинск, 10 – н. п. Коробье, 11 – н. п. Стахово, 12 – н. п. Семигостичи

Fig. 1. Location of research stations: 1 – Ivatsevichi, 2 – Bobrovichi, 3 – Vygonoshchi, 4 – Turna Bolshaya, 5, 6 – Brest, 7 – White Lake, 8 – Tomashovka, 9 – Pinsk, 10 – Koroby, 11 – Stahovo, 12 – Semigostichi

Экологическое структурирование населения тетрапод селитебных территорий проведено по оригинальной методике в регионе Белорусского Полесья. В зависимости от отношения диких животных к селитебным территориям выделены 4 группы видов: синантропы, спорадично-синантропные, эвритопно-синантропные, антропофобные. При этом виды-синантропы составляют синантропный экологический комплекс, а другие группы представлены видами, относящимися к различным комплексам [4, 5].

Результаты и их обсуждение. Сравнение результатов фаунистических наблюдений, проведенных нами в течение двух последовательных периодов (2010–2015 гг. и 2017–2022 гг.), позволило установить изменения, которые следует рассматривать как следствие продолжающегося в настоящее время процесса формирования синантропного населения селитебных территорий [4, 5, 10]. Анализ полученных учетных данных позволит сделать вывод о том, какими путями идет этот процесс.

По состоянию на 2019 г. на северных стационарах региона (г. Ивацевичи, н. п. Бобровичи, н. п. Выгонощи) произошло существенное увеличение видового богатства и численности популяционных группировок видов-синантропов в ходе расширения их ареала в целом (дятел сирийский (*Dendrocopos syriacus*), чекан черноголовый (*Saxicola torquata*), белозубка белобрюхая (*Crocidura leucodon*), куница каменная (*Martes foina*)) либо расселения на новые территории в пределах существующего ареала (стриж черный (*Apus apus*), грач (*Corvus frugilegus*), просянка (*Emberiza calandra*) и ряд других видов). В указанный период и на южных стационарах региона отмечено увеличение видового богатства синантропного экологического комплекса и спорадично-синантропных видов в результате тех же процессов: регистрация на новых территориях стрижа белобрюхого (*Tachymarptis melba*), нетопырей средиземноморского (*Pipistrellus kuhlii*) и лесного (*Pipistrellus nathusii*), белозубок малой (*Crocidura suaveolens*) и белобрюхой, шакала азиатского (*Canis aureus*). Но более очевидное увеличение видового богатства за счет регионально (субрегионально) новых видов может быть продемонстрировано на примере Выгонощанского стационара, где за период с 2010 по 2019 г. их количество возросло с 40 до 48 видов (увеличилось на 20 %), что позволяет говорить об активном дальнейшем формировании синантропного населения тетрапод путем расширения их ареалов. Это такие виды, как фазан обыкновенный (*Phasianus colchicus*), горлица кольчатая (*Streptopelia decaocto*), дятел сирийский, горихвостка-чернушка (*Phoenicurus ochruros*), чекан черноголовый, пищуха короткопалая (*Certhia brachydactyla*), вьюрок европейский (канареечный) (*Serinus serinus*), белозубка малая, ушан серый (*Plecotus austriacus*), нетопырь средиземноморский [6–8]. Эти новые виды, расселившиеся в исследуемом регионе в своих автохтонных ареалах, уже обитали в антропогенном ландшафте и, исходя из нашего подхода, могли быть отнесены к синантропным или спорадично-синантропным видам. Процесс изменения населения тетрапод селитебных территорий происходит не только в исследуемом нами регионе, но и в целом на всей территории Беларуси, о чем, например, свидетельствуют недавние сведения о появлении шакала азиатского и стрижа белобрюхого [4, 9–11]. Такой путь формирования синантропного населения – за счет вселения новых видов из сопредельных территорий – мы обозначаем как *географический*.

Следует отметить, что темпы и особенности формирования населения тетрапод в рамках географического пути различались в северной и южной частях исследуемого региона. Так, число новых видов синантропного населения было в 2–5 раз больше внутри и на севере региона, чем на его юго-западной периферии. Например, за 9 лет на крайнем юго-западе (н. п. Томашовка) появилось 6 новых видов, а на севере (н. п. Выгонощи) – 14. По-видимому, следует ожидать, что указанные различия сохранятся и в ближайшие годы.

Важно подчеркнуть, что в большинстве сравнений численность представителей одного и того же фонового вида тетрапод из состава синантропного населения на южных стационарах оказывалась значительно выше, чем на северных. Например, в последние годы обилие вьюрка канареечного на юге региона (н. п. Томашевка) составляло 3–5 поющих самцов/га, на севере региона (н. п. Выгонощи) – 0,1–0,4 поющих самцов/га. Число токующих самцов вяхиря (*Columba palumbus*) на указанных стационарах в этот период составляло 0,9–1,1 и 0,09–0,1 особей/га соответственно.

Второй путь формирования синантропного населения тетрапод характеризуется появлением в населенных пунктах внутривидовых группировок (городских популяций) местных эвритопных видов и освоением ими сразу нескольких или всех основных местообитаний (кор-

мовых, зимовальных, репродуктивных, ремизных) в пределах селитебного ландшафта. Такой путь можно определить как *ландшафтный*. Он характерен не только для юго-запада Беларуси, но и для всей территории нашей страны и других государств Европы. В исследуемом регионе наиболее типичные примеры указанного пути расселения демонстрируют такие виды, как жабы зеленая (*Bufo viridis*) и камышовая (*Epidalea calamita*), рябинник (*Turdus pilaris*), галка (*Coloeus monedula*), кожан двухцветный (*Vespertilio murinus*), куница каменная и др. В числе спорадично-синантропных видов на юго-западе Беларуси можно отметить активно формирующиеся синантропные популяционные группировки вяхиря, вороны серой (*Corvus cornix*), камышницы (*Gallinula chloropus*), сороки (*Pica pica*), лысухи (*Fulica atra*), лебедя-шипунa (*Cygnus olor*), некоторых видов амфибий и рептилий.

Особенно нагляден процесс освоения селитебного ландшафта на примере различных популяционных группировок рябинника. На юге региона (г. Брест, н. п. Семигостичи) этот вид в целом освоил все стадии селитебных ландшафтов, что позволяло бы отнести его к синантропам, как это сделано для северной Украины [12]. В то же время на севере Брестской области (н. п. Выгонощи, Бобровичи) этот вид, активно используя кормовые ресурсы селитебных местообитаний, гнездится, как правило, в агроландшафте за пределами населенных пунктов. Конечно, можно предположить, что на севере Брестской области имеет место феномен повторного формирования ранее утраченной синантропной популяции, что установлено для этого вида в г. Калининграде [13].

Отметим, что в научных публикациях второй половины XX в. не акцентировалось внимание на процессе синантропизации герпетофауны Беларуси [14, 15], но уже тогда некоторые авторы отмечали «наметившуюся в последнее время тенденцию к синантропизации отдельных видов герпетофауны (жаба зеленая, чесночница обыкновенная (*Pelobates fuscus*), лягушка озерная (*Pelophylax ridibundus*), лягушка прудовая (*Rana lessonae*)» [14]. «Отдельные виды лишь проявляют тенденцию к синантропизации (жаба зеленая, чесночница обыкновенная, лягушка озерная)» [14]. В последних монографических работах по фауне амфибий Беларуси синантропизация жабы зеленой и жабы камышовой отмечается уже вполне определенно [16]. Ландшафтный путь формирования синантропного населения тетрапод в целом свойствен большинству спорадично-синантропных видов.

Третий путь формирования синантропного населения тетрапод заключается в появлении селитебных популяций местных видов позвоночных животных, использующих не все или большинство, а только одну или некоторые немногие стадии в качестве местообитаний, чаще всего сезонно, в пределах селитебной территории. Типичные примеры: аист белый (*Ciconia ciconia*), ласточки деревенская (*Hirundo rustica*) и городская (*Delichon urbicum*), нетопыри малый (*Pipistrellus pygmaeus*) и лесной, ряд спорадично-синантропных видов, которыми на селитебных территориях используются исключительно или главным образом репродуктивные и/или гибридные местообитания. В то же время кормовые (как правило, обширные) и/или зимовальные местообитания этих видов простираются за пределами селитебных территорий. Такой путь определяется как *стациональный*, или *экологический*. В качестве примера можно назвать ряд видов водоплавающих птиц, зимующих на городских водных объектах региона с 1960-х гг. [17, 18]. В последние годы зимовальные местообитания в селитебных стадиях региона стала осваивать деряба (*Turdus viscivorus*) (г. Брест, Пинск, н. п. Выгонощи).

В этом отношении достаточно показательна ситуация с расширением ареала удода (*Upupa epops*) по Московской области. За короткий промежуток времени (с 1970 г. до 1990-х гг.) он распространился с юга до севера области [19]. Среди главных причин называется увеличение количества огородов с легкой рыхлой торфянистой почвой [19]. Т. е. в данном случае формирование синантропной группировки удода шло по стациональному и ландшафтному путям.

Среди млекопитающих примером стационального пути освоения наиболее соответствующей для жизни этого вида категории селитебных территорий (многоэтажной застройки) является кожан двухцветный [21; наши данные]. А в последние десятилетия по такому же пути освоила г. Брест и Пинск и вечерница рыжая (*Nyctalus noctula*).

Полагаем, что есть и комбинированные варианты этих трех путей. Например, кряква (*Anas platyrhynchos*), лебедь-шипун, вяхирь появились в г. Бресте как гнездящиеся и зимующие городские популяции в 1960-е и 1990-е гг. [18, 21]. В настоящее время среди этих видов в г. Бресте

наблюдаются группировки, обитающие как круглогодично (размножаются и кормятся в городе), так и сезонно (регулярно вылетают на кормовые участки за пределы города). Для видов-акклиматизантов комбинированный путь можно обозначить как *антропогеографический* (для ондатры (*Ondatra zibethicus*), *антрополандшафтный* (для фазана обыкновенного).

Целесообразно рассматривать еще и четвертый путь – деструктивный (в отличие от трех предыдущих конструктивных), или *экзоантропный*. Главным образом он характерен для антропофобных видов, и его роль в общем процессе формирования синантропного населения позвоночных региона отличается от остальных. Такой путь определяет ситуацию, когда селитебная территория или ее территориальные объекты (например, хозяйственные, рекреационные) надвигаются на естественные территории, в результате чего местообитания видов оказываются в условиях усиливающегося антропогенного влияния. В этих случаях некоторые из типичных антропофобных видов региона (филин (*Bubo bubo*), гоголь обыкновенный (*Vucephala clangula*), барсук (*Meles meles*) и др.) приобретают признаки эвритопно-синантропных видов. Если влияние антропогенной деятельности продолжает нарастать или происходит антропогенная трансформация местообитаний, то это ведет к исчезновению антропофобных видов в данных локалитетах.

На основе приведенных в статье сведений и ранее опубликованных данных представляется возможным составить структурно-функциональную схему формирования состава населения тетрапод селитебных территорий юго-запада Беларуси (рис. 2) [4, 5, 11].

Формирование состава и ландшафтно-экологической структуры позвоночных животных в селитебных местообитаниях юго-запада Беларуси, на наш взгляд, укладывается в общем виде в схему, описанную М. Л. McKinney [22], который указывает, что в диапазоне «город–не город» все виды диких животных, несмотря на разнообразие их реакций, соответствуют одной из трех стратегий: избегание, приспособление, эксплуатация. Как отмечают некоторые авторы, эта схема может быть использована при анализе населения позвоночных не только урбанизированных, но и антропогенных ландшафтов в целом, включая сельские селитебные территории [23].

Составленная нами классификация экологических групп соответствует трем стратегиям М. Л. McKinney [4, 5]: антропофобные виды – избегание, синантропные виды – эксплуатация, эвритопно-синантропные, спорадично-синантропные виды – приспособление.

Также стратегиям М. Л. McKinney соответствуют и выделенные нами четыре пути формирования населения тетрапод (см. рис. 2).

Схема на рис. 2 отражает связь выделенных экологических групп в составе синантропного населения тетрапод с соответствующими им стратегиями М. Л. McKinney через реализуемые ими пути при заселении селитебных территорий [4, 5]. В первом ряду по вертикали (стратегия избегания–экзоантропный путь–антропофобные виды) показан *деструктивный* путь, ведущий, как правило, к постепенному сокращению количества антропофобных видов на территории, заселяемой человеком. Но и в этом случае некоторые типичные антропофобные виды региона иногда проявляют признаки стациального пути перехода в статус эвритопно-синантропных видов, если трансформация захваченных естественных территорий не слишком существенна или происходит медленными темпами.

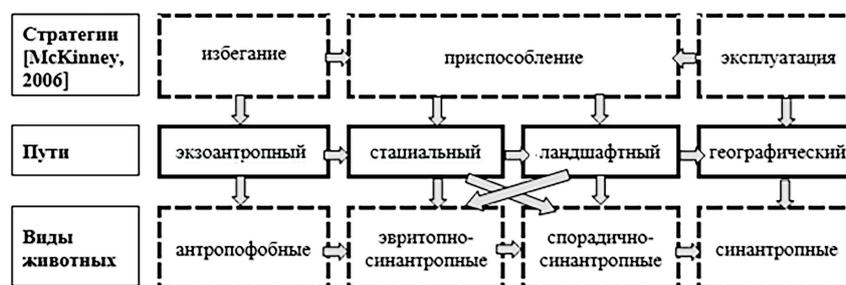


Рис. 2. Схема формирования видового и популяционного состава тетрапод селитебных территорий юго-запада Беларуси

Fig. 2. Scheme of formation of the species and population composition of tetrapods in the residential areas of south-west of Belarus

Заклучение. Таким образом, наши исследования позволяют сделать вывод о том, что формирование состава и ландшафтно-экологической структуры населения позвоночных животных в селитебных местообитаниях юго-запада Беларуси осуществляется тремя конструктивными путями (*географическим, ландшафтным, экологическим (стациональным)*) и одним деструктивным (*экзоантропоным*). В течение последнего десятилетия на селитебных территориях севера Брестской области отмечалось 5-кратное, по сравнению с юго-западом региона, увеличение числа новых видов синантропного экологического комплекса тетрапод.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список использованных источников

1. Скільський, І. В. Урбанізація як фактор змяні рэгіянальнай орнітофауны / І. В. Скільський // Беркут. – 1999. – Т. 8, вып. 1. – С. 1–8.
2. Atlas ptaków lęgowych Lubelszczyzny / J. Wójciak, W. Biaduń, T. Buczek, M. Piotrowska. – Lublin: Lubelskie T-wo Ornitologiczne, 2005. – 512 s.
3. Biaduń, W. Winter avifauna of Lublin – species composition, distribution and numbers / W. Biaduń // Беркут. – 2005. – Т. 14, вып. 1. – С. 1–23.
4. Демянчик, В. В. Изменение синантропного населения наземных позвоночных животных селитебных территорий юго-запада Беларуси за столетний период / В. В. Демянчик, М. Е. Никифоров // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя біялагічных навук. – 2018. – Т. 63, № 3. – С. 286–297.
5. Демянчик, В. В. Синантропный экологический комплекс и структура населения позвоночных на селитебных территориях Белорусского Полесья / В. В. Демянчик, М. Е. Никифоров // Весті Нацыянальная акадэміі навук Беларусі. Серыя біялагічных навук. – 2017. – № 3. – С. 7–17.
6. Görner, M. Säugetiere Europas / M. Görner, H. Hackethal. – Leipzig: Neumann Verl., 1987. – 372 s.
7. Biaduń, W. Trends in the arrival dates of spring migrants in Lublin (E Poland) / W. Biaduń, I. Kitowski, E. Filipiuk // Acta Ornithologica (Lublin). – 2009. – Vol. 44, N 1. – P. 89–94. <https://doi.org/10.3161/000164509x464920>
8. Птушкі Еўропы: палявы вызначальнік / Z. Czarnecki, K. A. Dobrowolski, V. Dobrowolski [і інш.]; агул. рэд., дап. і прадм.: М. Я. Нікіфараў; пер. з пол. мовы: Д. Вінчэўскі [і інш.]. – Варшава: Навук. выд-ва ПНВ, 2000. – 349 с.
9. Никифоров, М. Е. Региональные списки видов птиц и иммиграционный орнитофауногенез / М. Е. Никифоров, И. Э. Самусенко / Актуальные проблемы зоологической науки в Беларуси: материалы XI Зоол. Междунар. науч.-практ. конф., приуроч. к 10-летию основания ГНПО «НПЦ НАН Беларуси по биоресурсам» (Минск, 1–3 нояб. 2017 г.): в 2 т. / НАН Беларуси [и др.]; редкол.: О. И. Бородин [и др.]. – Минск, 2017. – Т. 1. – С. 275–293.
10. Демянчик, В. Т. Позвоночные животные Беларуси: учеб.-метод. пособие. / В. Т. Демянчик, М. Г. Демянчик. – Брест: Брест. гос. ун-т, 2015. – 139 с.
11. Молекулярно-генетическая идентификация инвазивного вида – шакала азиатского (*Canis aureus*) на территории Беларуси / Е. Э. Хейдорова, А. В. Шпак, К. В. Гомель [и др.] // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 1. – С. 86–92.
12. Скільський, І. В. О значимости видов и населении птиц / И. В. Скільський // Беркут. – 2002. – Т. 11, вып. 2. – С. 1–14.
13. Шукшина, М. С. История формирования и современное состояние городской популяции рябинника (*Turdus pilaris* L.) в Калининграде / М. С. Шукшина, Г. В. Гришанов // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. – 2014. – Вып. 7. – С. 8–17.
14. Пикулик, М. М. Земноводные Белоруссии / М. М. Пикулик. – Минск: Наука и техника, 1985. – 189 с.
15. Пикулик, М. М. Пресмыкающиеся Белоруссии / М. М. Пикулик, В. А. Бахарев, С. В. Косов. – Минск: Наука и техника, 1988. – 166 с.
16. Земноводные Беларуси: распространение, экология и охрана / С. М. Дробенков, Р. В. Новицкий, М. М. Пикулик [и др.]; под общ. ред. С. М. Дробенкова. – Минск: Белорус. наука, 2006. – 216 с.
17. Долбик, М. С. Ландшафтная структура орнитофауны Белоруссии / М. С. Долбик. – Минск: Наука и техника, 1974. – 308 с.
18. Долбик, М. С. К расширению ареала новых и малоизвестных в Белоруссии птиц / М. С. Долбик, Ф. Е. Рубин // Экология позвоночных животных Белоруссии: сб. ст. / Акад. наук БССР, Отд. зоологии и паразитологии; под ред. П. Ф. Рокицкого, И. Н. Сержанина. – Минск, 1965. – С. 100–103.
19. Конторщиков, В. В. Особенности распространения удода в Московской области / В. В. Конторщиков // Орнитология. – 2001. – Вып. 29. – С. 79–82.
20. Godlevska, L. V. New *Vespertilio murinus* (Chiroptera) winter records. An indication of expansion of the species' winter range? / L. V. Godlevska // Vestnik Zoologii. – 2013. – Vol. 47, N 3. – P. 239–244. <https://doi.org/10.2478/vzoo-2013-0023>
21. Шокало, С. И. Зимовки лебедя-шипуна в Брестской области / С. И. Шокало, Б. И. Шокало // Тезисы докладов XII Прибалтийской орнитологической конференции, 15–18 ноября 1988 г. / Акад. наук Лит. ССР [и др.]; редкол.: Р. Р. Будрис [и др.]. – Вильнюс, 1988. – С. 252–254.
22. McKinney, M. L. Urbanization as of a major cause of biotic homogenization / M. L. McKinney // Biological Conservation. – 2006. – Vol. 127, N 3. – P. 247–260. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2005.09.005>
23. Годлевская, Е. Синантропизация фауны: вопросы терминологии / Е. Годлевская, Д. Вишневский, Н. Атамась // Праці Теріологічної школи / Нац. наук.-природн. музей НАН України, Укр. теріол. т-во. – Луганськ, 2006. – Вип. 8: Фауна в антропогенному середовищі. – С. 6–13.

References

1. Skil'skii I. V. Urbanization as a factor in changing regional avifauna. *Berkut = Berkut*, 1999, Vol. 8, iss. 1, pp. 1–8 (in Ukrainian).
2. Wójciak J., Biaduń W., Buczek T., Piotrowska M. *Atlas of breeding birds of the Lublin area*. Lublin, Lubelsky Society of Ornithology, 2005. 512 p.
3. Biaduń V. Winter avifauna of Lublin – species composition, distribution and abundance. *Berkut = Berkut*, 2005, Vol. 14, iss. 1, pp. 1–23.
4. Demyanchik V. V., Nikiforov M. E. Changes in the synanthropic population of terrestrial vertebrates of residential territories of the south-west of Belarus. *Vesti Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya biyalagichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological series*, 2018, vol. 62, no. 3, pp. 286–297 (in Russian).
5. Demyanchik V. V., Nikiforov M. E. Synanthropic ecological complex and the structure of the vertebrate population in the residential territories of the Belarusian Polesie. *Vesti Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya biyalagichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological series*, 2017, no. 3, pp. 7–17 (in Russian).
6. Görner M., Hackethal H. *Mammals of Europe*. Leipzig, Neumann Verlag, 1987. 372 p.
7. Biaduń V., Kitowski I., Filipyuk E. Trends in the dates of arrival of spring migrants in Lublin (E Poland). *Acta Ornithologica (Lublin)*, 2009, Vol. 44, no. 1, pp. 89–94. <https://doi.org/10.3161/000164509x464920>
8. Czarnecki Z., Dobrowolski K. A., Jablonski B., Novak E., Siwek W., Nikifarau M. Ya. *Birds of Europe*. Warsaw, Naukovoe vydavetstva PVN Publ., 2000. 349 p. (in Russian).
9. Nikiforov M. E., Samusenko I. E. Regionological observations of birds and migratory ornithogaunogenesis. *Aktual'nye problemy zoologicheskoi nauki v Belarusi: materialy XI Zoologicheskoi Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, priurochennoi k desyatiletiyu osnovaniya GNPO "NPTs NAN Belarusi po bioresursam" (Minsk, 1–3 noyabrya 2017 goda). Tom 1* [Current issues of zoological science in Belarus: Proceedings of the XI Zoological International Scientific and Practical Conference dedicated to the tenth anniversary of the foundation of the State Scientific and Production Association "Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Bioresources" (Minsk, November 1–3, 2017). Vol. 1]. Minsk, 2017, pp. 275–293 (in Russian).
10. Demyanchik V. T., Demyanchik M. G. *Vertebrate animals of Belarus*. Brest, Brest State University, 2015. 139 p. (in Russian).
11. Heydorova E. E., Shpak A. V., Homel K. V., Sidorovich V. E., Demyanchik V. V., Prokopchuk V. V., Nikiforov M. E. Molecular genetic identification of an invasive species – asian jackal (*Canis aureus*) in the territory of Belarus. *Daklady Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological series*, 2018, vol. 62, no. 1, pp. 86–92 (in Russian).
12. Skil'skii I. V. On the importance of bird species and populations. *Berkut = Berkut*, 1999, Vol. 1, no. 2. pp. 1–14 (in Russian).
13. Shukshina M. S., Grishanov G. V. Research and modern state of urban populations of the anglerfish (*Turdus pilaris* L.) in Kalingrad. *Vestnik Baltiiskogo federal'nogo universiteta imeni I. Kanta* [Bulletin of the Immanuel Kant Baltic Federal University], 2014, iss. 7, pp. 8–17 (in Russian).
14. Pikulik M. M. *Amphibians of Belarus*. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1985. 189 p. (in Russian).
15. Pikulik M. M., Bakharev V. A., Kosov S. V. *Reptiles of Belarus*. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1988. 166 p. (in Russian).
16. Drobenkov S. V., Novitskii R. V., Pikulik M. M., Kosova L. V., Ryzhevich K. K. *Amphibians of Belarus: distribution, ecology and protection*. Minsk, 2006. 216 p. (in Russian).
17. Dolbik M. S. *Landscape structure of the avifauna of Belarus*. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1974. 308 p. (in Russian).
18. Dolbik M. S., Rubin F. E. Towards the expansion of the range of new and little-known birds in Belarus. *Ekologiya pozvonochnykh zhivotnykh Belorussii: sbornik statei* [Ecology of vertebrate animals of Belarus: collection of articles]. Minsk, 1965, pp. 100–103 (in Russian).
19. Kontorshchikov V. V. Features of *Upupa epops* distribution in the Moscow region. *Ornitologiya = Ornithologia*, 2001, iss. 29, pp. 79–82 (in Russian).
20. Godlevska L. V. New *Vespertilio murinus* (Chiroptera) winter records. An indication of expansion of the species' winter range? *Vestnik zoologii = Bulletin of Zoology*, 2013, vol. 47, no. 3, pp. 239–244. <https://doi.org/10.2478/vzoo-2013-0023>
21. Shokalo S. I., Shokalo B. I. Wintering of the swan-gipun in the Brest region. *Tezisy dokladov XII Pribaltiiskoi ornitologicheskoi konferentsii, 15–18 noyabrya 1988 goda* [Abstracts of the XII Baltic Ornithological Conference, November 15–18, 1988]. Vilnius, 1988, pp. 252–254 (in Russian).
22. McKinney M. L. Urbanization as one of the main causes of biotic homogenization. *Biological Conservation*, 2006, vol. 127, no. 3. pp. 247–260 <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2005.09.005>
23. Godlevskaya E., Vishnevskii D., Atamas' N. Synanthropization of fauna: issues of terminology. *Pratsi Teriologichnoi shkoli. Vipusk 8: Fauna v antropogennomu seredovishchi* [Proceedings of the Theriological School. Iss. 8: Fauna in the anthropogenic environment]. Luhansk, 2006, pp. 6–13 (in Russian).

Информация об авторе

Демянич Виктор Викторович – научный сотрудник. Полесский аграрно-экологический институт НАН Беларуси (ул. Советских Пограничников, 41, 220030, г. Брест, Республика Беларусь). <http://orcid.org/0000-0002-3698-2793>. E-mail: koktebel.by@gmail.com

Information about the author

Viktor V. Demyanchik – Researcher. Polesie Agrarian Ecological Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (41, Sovetskikh Pogranichnikov Str., 220030, Brest, Republic of Belarus). <http://orcid.org/0000-0002-3698-2793>. E-mail: koktebel.by@gmail.com

ISSN 1029-8940 (Print)
ISSN 2524-230X (Online)
УДК 57.083.3
<https://doi.org/10.29235/1029-8940-2025-70-1-55-68>

Поступила в редакцию 28.06.2024
Received 28.06.2024

Е. П. Киселева, К. И. Михайлопуло, О. В. Свиридов

Институт биоорганической химии НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

НОВАЯ ТЕСТ-СИСТЕМА ДЛЯ ДЕТЕКЦИИ НАЛИЧИЯ САЛЬМОНЕЛЛ В ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТАХ МЕТОДОМ КОНКУРЕНТНОГО ИММУНОФЕРМЕНТНОГО АНАЛИЗА

Аннотация. Детекция сальмонелл в продуктах питания является актуальной в связи с известными случаями эпидемии сальмонеллеза. С этой целью широко применяют иммунохимические методы, в частности, иммуноферментный анализ (ИФА). По традиции в ИФА сальмонелл используют антитела к липополисахариду (ЛПС), который принято считать основным структурным компонентом наружной мембраны клетки грамотрицательных бактерий. Для взаимодействия с антителами доступен кор (консервативный элемент ЛПС, общий для всех сальмонелл) и О-антиген (гипервариабельный элемент ЛПС). Метод ИФА с использованием коммерческого моноклонального антитела (МАТ) 5D12A (к кору ЛПС) или МАТ 10D9H (к общему эпитопу О-антигена сальмонелл серогрупп А, В и D) показал, что в культуре сальмонелл, полученной в ходе пробоподготовки, традиционной для анализа этих бактерий в продуктах питания, ЛПС присутствует главным образом в среде (не менее 90 %). Установлено, что дополнение стандартной процедуры пробоподготовки центрифугированием с целью отделения бактерий от среды и последующий анализ именно среды позволяют расширить рабочий диапазон тест-системы в сторону более низких концентраций ЛПС и повысить аналитическую чувствительность. Показано, что иммобилизация в лунках микропланшетного иммуносорбента конъюгата бычий сывороточный альбумин (БСА)-ЛПС позволяет получить более однородное покрытие, чем иммобилизация ЛПС как такового. Созданы конструкции двух тест-систем для детекции сальмонелл в продуктах питания методом конкурентного ИФА ЛПС, секретированного в культуральную среду. В каждой из двух тест-систем на твердой фазе иммобилизован конъюгат БСА-ЛПС, а в жидкой фазе находятся либо МАТ 5D12A, либо МАТ 10D9H. Чувствительность анализа для каждой из тест-систем соответствует 10^5 КОЕ/мл. Тест-система на основе МАТ 5D12A, специфичных к кору ЛПС, имеет преимущество: позволяет детектировать все сальмонеллы, независимо от серотипа.

Ключевые слова: конкурентный иммуноферментный анализ, сальмонелла, липополисахарид, моноклональные антитела

Для цитирования: Киселева, Е. П. Новая тест-система для детекции наличия сальмонелл в пищевых продуктах методом конкурентного иммуноферментного анализа / Е. П. Киселева, К. И. Михайлопуло, О. В. Свиридов // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя біялагічных навук. – 2025. – Т. 70, № 1. – С. 55–68. <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2025-70-1-55-68>

Elena P. Kiseleva, Konstantin I. Mikhailopulo, Oleg V. Sviridov

Institute of Bioorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

A NEW TEST SYSTEM FOR *SALMONELLA* DETECTION IN FOOD PRODUCTS BY COMPETITIVE IMMUNOASSAY

Abstract. Detecting *Salmonella* in foods is topical due to the known cases of salmonellosis epidemics. Immunochemical methods including enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA) have been widely used in *Salmonella* detection. Traditionally, ELISA of *Salmonella* is based on detecting lipopolysaccharide (LPS), which is considered to be the main structural component of the outer membrane of the cell of Gram-negative bacteria. Core (conservative LPS element common to all *Salmonella*) and O-antigen (hypervariable LPS element) are available for interaction with antibodies. It was shown using commercial MAb 5D12A (to the core of LPS) or MAb 10D9H (to the common epitope of the O-antigen of *Salmonella* serogroups A, B and D) that in the *Salmonella* culture obtained during sample preparation, traditional for the analysis of these bacteria in foods, LPS is present mainly outside cells, in the medium (no less than 90 %). It has been found that the addition of centrifugation to the standard sample preparation procedure to separate bacteria from the medium and a subsequent analysis of the medium can expand the test-system working range towards lower LPS concentrations and increase the analytical sensitivity. It has been shown that immobilization of the bovine serum albumin (BSA)-LPS conjugate in the wells of a microplate immunosorbent allows one to obtain a more homogeneous coating than immobilization of LPS itself. We have elaborated 2 test systems for *Salmonella* detection in foods by competitive ELISA of LPS secreted in medium. In each of the two test

systems, the BSA-LPS conjugate is immobilized on the solid phase, and in the liquid phase there are either MAb 5D12A or MAb 10D9H. The sensitivity of the analysis for each test system is 10^5 CFU/ml. The test system based on MAb 5D12A is advantageous since it allows detecting all *Salmonella* regardless of serotype.

Keywords: competitive enzyme immunoassay, salmonella, lipopolysaccharide, monoclonal antibodies

For citation: Kiseleva E. P., Mikhailopulo K. I., Sviridov O. V. A new test system for *Salmonella* detection in food products by competitive immunoassay. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya biyalagichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological series*, 2025, vol. 70, no. 1, pp. 55–68 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2025-70-1-55-68>

Введение. По данным мировой статистики, ежегодно регистрируется примерно от 200 млн до 1 млрд случаев сальмонеллеза. И 85 % заболеваний связано именно с употреблением пищи, загрязненной сальмонеллой [1, 2]. Практически любая пища может быть заражена сальмонеллой, которая сохраняет жизнеспособность при хранении. В одних продуктах во время их приготовления (жарка, тушение и т. д.) сальмонелла погибает под воздействием высоких температур, другие продукты питания (например, овощи и фрукты) можно дезинфицировать посредством мытья. Однако многие продукты поступают к потребителю уже готовыми к употреблению, и если в них присутствует сальмонелла, то ее невозможно уничтожить. Время выживания сальмонелл в таких продуктах может составлять 8–12 месяцев [3]. А для развития заболевания необходимо наличие всего лишь 7–8 log₁₀ сальмонелл [4]. Поэтому проверка продуктов питания на наличие сальмонеллы чрезвычайно важна.

Сальмонеллы – палочкообразные с закругленными краями, грамотрицательные, не образующие споры и капсулы, в основном подвижные бактерии, имеющие диаметр от 0,7 до 1,5 мкм и длину от 2 до 5 мкм, со жгутиками, распределенными по всей поверхности клетки. Сальмонеллы являются хемотрофами, факультативными анаэробами и относятся к факультативным внутриклеточным патогенам. Бактерии рода *Salmonella* относятся к семейству *Enterobacteriaceae*. В соответствии с современной номенклатурой род *Salmonella* включает 2 вида: *Salmonella enterica* и *Salmonella bongori*. Вид *Salmonella enterica* содержит 6 подвигов: **I** *S. enterica*, **II** *S. salamae*, **IIIa** *S. arizonae*, **IIIb** *S. diarizonae*, **IV** *S. houtenae*, **VI** *S. indica* (*S. bongori* ранее считалась подвигом **V**). Только *S. Enterica* subsp. *enterica* (**I**) патогенна для человека и теплокровных животных, остальные подвиды *S. enterica* и *S. bongori* (**V**) являются патогенами холоднокровных животных или обитают вне организма [5].

Каждый подвид сальмонелл имеет множество серотипов, т. е. групп микроорганизмов с одинаковым составом поверхностных антигенов. Серотипирование сальмонелл основано на разнообразии О-антигена (одна из трех составных частей липополисахарида (ЛПС)), и Н-антигена (часть флагеллы (жгутика)). У сальмонелл имеется 46 разновидностей О-антигенов и 114 разновидностей Н-антигенов, которые в различных комбинациях составляют более 2600 зарегистрированных серотипов [5]. Абсолютно ясно, что создание универсальной тест-системы для детекции сальмонелл, основанной на использовании антител к О-антигену, представляет серьезную проблему.

Большинство серотипов сальмонелл относятся к *S. enterica* subsp. **I** (*S. enterica enterica*). Именно эта бактерия является причиной различных инфекционных заболеваний человека, в том числе тифа (*S. enterica enterica* серотип *typhi*, в упрощенном виде *S. typhi*), паратифа (*S. paratyphi* A, *S. paratyphi* B, *S. paratyphi* C) и сальмонеллеза (*S. enteritidis*, *S. typhimurium*, *S. agona*, *S. heidelberg*, *S. newport* и др.). Наиболее распространенными серогруппами О-антигена *S. enterica enterica* являются А, В, С1, С2, D и Е; штаммы этих серогрупп вызывают примерно 99 % сальмонеллезных инфекций у людей и теплокровных животных [6, 7].

Наиболее развернутая и логичная классификация методов обнаружения сальмонелл представлена в работе М. S. Awang с соавт. [8]. Она включает: (1) метод микробиологического культивирования, (2) иммунологические методы, (3) молекулярные методы, (4) методы масс-спектрометрии, (5) методы спектроскопии, (6) метод оптического фенотипирования и (7) методы детекции с использованием электрохимических биосенсоров. Методы 1–3 лежат в основе коммерческих наборов реагентов для идентификации сальмонелл в продуктах питания [9].

История создания тест-систем для детекции сальмонелл в продуктах питания методом иммуноферментного анализа (ИФА) восходит к 1980-м гг. [10]. Как правило, в коммерческих тест-

системах для ИФА сальмонелл используются коммерческие моноклональные антитела (МАТ), специфичные к ЛПС [9, 11]; в немногочисленных публикациях рассматривается возможность использования МАТ к флагеллину [12]. Следует отметить отсутствие коммерческих тест-систем для определения сальмонелл, основанных на методе конкурентного ИФА. Данная ситуация объясняется трудностью получения однородного и стабильного при хранении покрытия полистирольных микропланшетов с использованием водных растворов ЛПС, что будет подробно обсуждаться ниже. В научных изданиях присутствует единственная работа, посвященная детекции сальмонелл конкурентной иммунохроматографией [13], в которой ЛПС иммобилизован на бумажном носителе в виде конъюгата с бычьим сывороточным альбумином (БСА), а для выявления ЛПС используются МАТ к кору, являющемуся консервативной частью ЛПС и имеющему одинаковую структуру у всех сальмонелл. Проблема создания тест-систем для детекции сальмонелл методом конкурентного ИФА трудноразрешима даже с использованием конъюгата БСА-ЛПС, так как авторы цитируемой выше статьи [13] применяли указанный конъюгат только для иммунизации животных с целью получения МАТ и разработали с их использованием тест-систему, основанную на принципе «сэндвич»-анализа [14].

При применении коммерческих тест-систем для количественного определения сальмонелл в продуктах питания проводится стандартная процедура пробоподготовки: образец анализируемого продукта вносится в культуральную среду. В ходе роста культуры сальмонелл происходит амплификация антигенов бактерий, выявляемых с помощью специфических антител. Культура сальмонелл представляет собой почти гомогенную суспензию, но после ее термообработки, направленной на лишение бактерий жизнеспособности, клетки оседают и образуют мелкодисперсный осадок, легко всплывающий при перемещении колбы с культурой. При отборе пробы для внесения в лунки планшета для ИФА в ее составе могут оказаться как среда, так и клетки в непредсказуемой пропорции.

В соответствии с классическими представлениями ЛПС является основным структурным компонентом (до 90 %) наружной мембраны клетки сальмонелл и других грамотрицательных бактерий. Вместе с тем специалистам в области биомедицинских исследований давно известен факт секреции ЛПС в составе так называемых везикул наружной мембраны (ВНМ), а выяснению механизмов их биогенеза посвящены многочисленные работы [15–19].

В основе современных публикаций о выделении ЛПС [20, 21] лежит водная экстракция горячим фенолом целевого вещества из клеток бактерий. База метода – работа О. Westphal, К. Jann [22]. В работе Е. Sarmikasoglou, А. Р. Faciola [23] представлен обзор других известных методов экстракции ЛПС, но в любом случае исходным биологическим материалом являются именно клетки бактерий. Биотехнологи только недавно обратили внимание на факт присутствия ЛПС вне клетки. В 2021 г. появилась статья М. Р. Назирова с соавт. [24], в которой показано, что выделение ЛПС другого грамотрицательного микроорганизма *Bordetella pertussis* целесообразно проводить из культуральной среды, а не из клеток, так как его содержание в среде намного выше.

Цель работы – создать иммуноферментные тест-системы для количественного определения сальмонелл в продуктах питания методом конкурентного ИФА с улучшенными параметрами. Достижение цели осуществлялось посредством решения нескольких задач. Во-первых, создание гомогенного покрытия полистирольных микропланшетов с иммобилизованным антигеном. Во-вторых, изучение распределения ЛПС в системе «клетка-среда» и на основе полученных результатов создание усовершенствованной процедуры пробоподготовки для использования в ИФА фракции, содержащей максимальное количество ЛПС. В-третьих, использование для детекции ЛПС МАТ к кору, который является консервативным элементом ЛПС, общим для всех сальмонелл и отличающимся от аналогичной составной части ЛПС других грамотрицательных бактерий.

Материалы и методы исследования. Бактерии. Использовали *Salmonella enterica enterica*, серотипы *derby* (I), *typhimurium* (II), *typhimurium* SL7207 (III), *newport* (IV), *enteridis* (V), *london* (VI), полученные в РНПЦ эпидемиологии и микробиологии Минздрава Республики Беларусь (I, II, IV–VI) и в Институте микробиологии НАН Беларуси (III). Бактерии растили на селективной среде для выделения сальмонелл висмут-сульфит агар (АО «НПО «Микроген», РФ), а затем на среде трипказо-соевый (TSA) агар («Биомедиа», РФ) при температуре 37 ± 1 °C

в течение 24 ± 3 ч для каждой среды, смывали с чашек 0,9 % NaCl. Идентификацию сальмонелл серотипов I–VI проводили с использованием автоматического микробиологического анализатора Vitek 2 Compact (BioMerieux SA, Франция). Бактерии лишали жизнеспособности нагреванием при 60 °С в течение 15 мин. Добавляли тимеросаль до концентрации 0,2 % и хранили при температуре 4 °С. Полноту инактивации определяли высевом на указанные выше питательные среды. Концентрацию бактерий определяли в камере Горяева.

Антитела. МАТ 5D12А и 10D9Н (Bio-Rad, США).

Антигены. ЛПС из *Salmonella enterica enterica*, серотип *typhimurium* (Sigma-Aldrich, США).

Конъюгат БСА-ЛПС. Для синтеза конъюгата БСА-ЛПС был выбрана схема, аналогичная описанной в работе X. Wu с соавт. [14]. Для удаления избытка реагентов и побочных продуктов реакции реакционную смесь обессоливали на колонке HiTrap Desalting, 5 мл (GE, США), уравновешенной 0,2 М раствором NaCl, содержащим 0,1 % NaN₃. Концентрацию БСА в составе конъюгата определяли спектрофотометрически, принимая удельный коэффициент экстинкции $A_{1 \text{ мг/мл}, 280 \text{ нм}, 1 \text{ см}}$ равным 0,67. К конъюгату БСА-ЛПС добавляли глицерин до концентрации 50 % и хранили при температуре –20 °С.

Приготовление микропланшетов с иммобилизованным антигеном. Иммобилизовали БСА-ЛПС из раствора 0,01 М НФБ, pH 7,5, с концентрацией 2 мкг/мл (по БСА) при комнатной температуре (КТ) в течение ночи, из расчета 0,1 мл на лунку. Иммобилизовали ЛПС *Salmonella enterica enterica* серотип *typhimurium* (Sigma-Aldrich, США) из растворов 0,01 М НФБ, pH 7,5, 0,1 М NaHCO₃, pH 8,3 и 0,1 М глицина, pH 2,0, содержащих 0,1 % NaN₃ каждый, с концентрациями ЛПС 0,25–1 мкг/мл при КТ в течение ночи, из расчета 0,1 мл на лунку. При иммобилизации ЛПС были соблюдены все предосторожности, указанные в инструкции по эксплуатации коммерческого препарата ЛПС.

Удаляли содержимое лунок. В каждую лунку вносили по 200 мкл раствора для стабилизации иммобилизованного антигена следующего состава: 0,05 М НФБ, pH 7,5, 0,15 М NaCl, 5 % сахара, 2 % сорбит, 0,1 % БСА, 0,05 % Твин 20, 0,1 % NaN₃. Выдерживали при КТ в течение ночи. Удаляли содержимое лунок переворачиванием планшета. Сушили планшеты при КТ в течение ночи. Запечатывали с использованием вакуумного упаковщика HVC-260T/1A (Hualian, Китай).

Приготовление препаратов «среда», «клетки», «среда + клетки». Перемешивали препараты клеток, хранившиеся при температуре 4 °С, вручную, переворачивая герметично закрытые флаконы не менее 100 раз. Для разведения клеток использовали (инкубационный буфер (ИнБ) следующего состава: 0,05 М Трис, pH 7,7, 0,15 М NaCl, 0,05 % Твин 20, 0,1 % БСА, 0,1 % пептон казеиновый, 0,1 % NaN₃, 0,1 % зуксил К-100. Готовили две серии растворов равного объема (объем А, мл), содержащих $1,2 \cdot (10^5\text{--}10^8)$ КОЕ/мл клеток бактерий (серии 1 и 2, эппендорфы № 1–11 в каждой серии). Каждая серия также включала эппендорф № 12, содержащий А мл ИнБ.

Готовили соосадитель. В ИнБ добавляли муку пшеничную высший сорт (премиум) (ОАО «Лидяхлебопродукт», РБ) из расчета 0,07 г на 1 мл, энергично перемешивали 1 мин на встряхивателе Vortex V-1 plus (Biosan, Латвия) и оставляли на 1 мин. Легкая фракция муки находилась в виде суспензии над осадком, состоящим из тяжелой фракции муки. Переносили суспензию в отдельную пробирку и вносили в каждый эппендорф серий 1 и 2 из расчета 1:9, мл/мл; перед внесением в каждый эппендорф суспензию перемешивали на встряхивателе в течение 30 с.

Эппендорфы серий 1 и 2 центрифугировали при ускорении 1000 g 20 мин при КТ с использованием центрифуги Microfuge 18 (Beckman Coulter, США). Каждый эппендорф серии 1 перемешивали на встряхивателе до образования гомогенной суспензии (препарат «супернатант + клетки»). Из эппендорфов серии 2 отбирали надосадочную жидкость (А мл) в отдельные пробирки (серия 3), подписанные соответствующим образом (препарат «среда»). В каждый эппендорф серии 2 с осадком вносили А мл ИнБ и перемешивали на встряхивателе до образования гомогенной суспензии (препарат «клетки»).

ИФА. В соответствующие лунки планшета с иммобилизованным конъюгатом БСА-ЛПС (или ЛПС) вносили по 100 мкл (в дублях) каждого препарата («среда», «клетки», «среда + клетки») в соответствии с предварительно составленной схемой. Непосредственно перед внесением препаратов «клетки» и «среда + клетки» в лунки каждый эппендорф (№ 1–12) перемешивали 30 с на встряхивателе.

В каждую лунку вносили по 20 мкл раствора МАТ 5D12А (или МАТ 10D9Н) в ИнБ с концентрацией МАТ, в 6 раз превышающей ту, которая должна находиться в окончательном объеме в лунке. Выдерживали при КТ 2 ч (1-я стадия ИФА). Удаляли содержимое лунок переворачиванием планшета. Промывали планшет промывочным буфером (ПБ) следующего состава: 0,025 М Трис, рН 7,7, 0,15 М NaCl, 0,1 % Твин 20, 5 раз из расчета 250 мкл на лунку.

В каждую лунку вносили 100 мкл раствора конъюгата поликлональных антител козы против иммуноглобулинов мыши с пероксидазой из корней хрена (Goat anti-mouse – horseradish peroxidase, GAM-HRP) (Sigma-Aldrich, США) с предварительно подобранным титром. Выдерживали 1 ч при КТ (2-я стадия ИФА). Удаляли содержимое лунок и промывали планшет, как указано выше.

В каждую лунку вносили 100 мкл раствора 1-Step™ TMB ELISA Substrate Solutions (Thermo Fisher Scientific, США), содержащего 3,3',5,5'-тетраметилбензидин (хромоген) и пероксид водорода (субстрат HRP), и выдерживали 10–20 мин при КТ. Останавливали реакцию HRP внесением в каждую лунку 100 мкл 4,8 % H₂SO₄. Определяли оптическую плотность раствора в лунках с использованием микропланшетного ридера iMark™ (Bio-Rad, США) под управлением программы MPM 6.exe. Для каждой серии лунок производили расчет значений V_n/V₀, % средствами Microsoft Excel.

Аналитическая чувствительность и коэффициент вариации. Аналитическую чувствительность (нижний предел обнаружения) ИФА-теста определяли с помощью графика в координатах OY – ОП₄₅₀, OX – концентрация клеток (КОЕ/мл). Сначала рассчитывали значение стандартного отклонения (standard deviation, SD) по формуле для препаратов «среда» и «среда + клетки», соответствующих концентрации клеток 10⁷ КОЕ/мл, каждый в 12 повторах.

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (B_i - \bar{B})^2}{n - 1}},$$

где B_i – значение ОП₄₅₀ в каждой из лунок с образцом; \bar{B} – среднее арифметическое значение ОП₄₅₀ в каждой из лунок с образцом; n – количество измерений.

Затем вдоль оси OY от точки B₀ откладывали отрезок, равный значению 3SD. Через полученную точку проводили линию, параллельную оси OX, до пересечения с калибровочной кривой. Координата этой точки на оси OX соответствует значению аналитической чувствительности.

Коэффициент вариации (КВ, относительное стандартное отклонение (%)) рассчитывали по формуле

$$КВ = SD / \bar{B} \cdot 100.$$

Результаты и их обсуждение. Мы предлагаем следующую конструкцию тест-системы для детекции сальмонелл в продуктах питания методом конкурентного ИФА. На твердой фазе иммобилизован антиген (в данном случае ЛПС). В жидкой фазе находится аналогичный антиген (в составе анализируемого биоматериала или в составе калибраторов) и специфические МАТ. На 1-й стадии ИФА антитела образуют иммунные комплексы с иммобилизованным и находящимся в жидкой фазе антигеном. Последние удаляются из системы в ходе промывки лунок. На 2-й стадии ИФА происходит детекция МАТ, находящегося в составе иммунных комплексов с иммобилизованным антигеном, с использованием конъюгата антител животных против иммуноглобулинов мыши, меченных ферментом. Количество МАТ, связавшегося с иммобилизованным антигеном, обратно пропорционально концентрации антигена в жидкой фазе.

В соответствии с поставленными задачами мы изучили возможность создания гомогенного и стабильного при хранении покрытия полистирольных микропланшетов для конкурентного ИФА сальмонелл. Мы иммобилизовали ЛПС (из растворов с различными значениями рН) и конъюгат БСА-ЛПС (из раствора, традиционно используемого для иммобилизации большинства белков), каждый препарат в серии из 13 лунок, достаточной для статистической обработки результатов. При иммобилизации ЛПС были соблюдены все предосторожности, содержащиеся в инструкции по эксплуатации коммерческого препарата ЛПС, с целью предотвращения агрегации ЛПС в растворе. Данные представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Зависимость качества функционализированных микропланшетов от иммобилизованного вещества и условий его иммобилизации

Table 1. Dependence of the quality of functionalized microplates on the immobilized substance and the conditions of its immobilization

Параметры ИФА	Способ приготовления твердой фазы			
	БСА-ЛПС	ЛПС		
	0,01 М НФБ, рН 7,4	0,01 М НФБ, рН 7,4	0,1 М NaHCO ₃ , рН 8,3	0,1 М глицин, рН 2
Минимальное значение ОП ₄₅₀	0,83	0,84	1,09	0,60
Максимальное значение ОП ₄₅₀	1,05	1,34	1,56	1,06
Среднее значение ОП ₄₅₀ ± 3SD (n = 13)	0,94 ± 0,23	1,09 ± 0,40	1,28 ± 0,53	0,84 ± 0,45
КВ, %	8	13	18	15

П р и м е ч а н и е. Для детекции ЛПС использовали МАТ 5D12А.

Данные табл. 1 свидетельствуют о том, что иммобилизация конъюгата БСА-ЛПС позволяет получить более однородное покрытие (КВ = 8 %) по сравнению с иммобилизацией ЛПС как такового (КВ = 13–18 %). Очевидна также зависимость количества иммунных комплексов на твердой фазе от рН раствора для иммобилизации ЛПС.

При интерпретации результатов мы принимали во внимание известное свойство ЛПС образовывать различные супрамолекулярные структуры [25], обусловленное химическим строением этого вещества. Молекула ЛПС состоит из трех областей: липид А, основной регион, или кор (внутренний кор плюс внешний кор), и О-антиген [26]. Только последний экспонирован во внешнюю среду и состоит из повторяющихся мотивов (3–7 моносахаридов), число которых может достигать 40. Алифатические цепи жирных кислот и фосфорилированные сахара в составе липида А, карбоксильные группы уникального моносахарида 2-кето-3-дезоксооктоновой кислоты и фосфоэтаноламин в составе внутреннего кора непосредственно участвуют в образовании супрамолекулярных структур ЛПС в водных растворах [25]. Рентгеноструктурные исследования показывают, что агрегаты ЛПС могут иметь пластинчатую, кубическую или перевернутую гексагональную конформацию [27]. Факторами, влияющими на структуру и молекулярную массу агрегатов ЛПС в водных растворах, являются двухвалентные ионы, неионные детергенты, температура, рН и ионная сила раствора [26].

Известно, что в результате агрегации ЛПС утрачивает способность к образованию специфических комплексов с выявляющими реагентами, например, антителами в ИФА или фактором С атлантического мечехвостого краба *Limulus polyphemus* в LAL-тесте (*Limulus amoebocyte lysate test*), проводимом для определения пирогенности лекарственных препаратов. О значении явления недооткрытия (маскировки) ЛПС для производителей биофармацевтических препаратов свидетельствуют многочисленные публикации на данную тему [28–31] и проведение в 2016 г. международной конференции Low Endotoxin Recovery/Masking (Munich/Bernried, Germany).

Исходя из данных табл. 1, во всех последующих экспериментах мы использовали микропланшеты с иммобилизованным конъюгатом БСА-ЛПС. Изучение распределения ЛПС в системе «клетка-среда» проводили по схеме, представленной на рис. 1.

Мы использовали два МАТ, одно из которых было специфично к общему эпитопу О-антигена ЛПС сальмонелл серогрупп А, В и D (МАТ 10D9Н), а именно антигену «0–12» [2-D-манноза (1–4) I-рамноза (1–3)D-галактоза], а другое – к кору ЛПС (МАТ 5D12А). При выборе МАТ учитывали, что (1) все бактерии рода *Salmonella* содержат только один вид кора, который отличается от такового других грамтрицательных бактерий, (2) известно очень много вариантов О-антигена, (3) существуют мутанты сальмонелл, лишённые О-антигена («грубый» фенотип или R-фенотип) [32–34]. На этом основании мы считали, что МАТ к кору имеет преимущество по сравнению с МАТ к О-антигену в качестве выявляющего реагента в универсальной тест-системе, пригодной для детекции всех сальмонелл.

В лунках планшета с иммобилизованным конъюгатом БСА-ЛПС на 1-й стадии анализа в жидкой фазе находились МАТ 5D12А или МАТ 10D9Н и один из трех препаратов («среда»,

«клетки», «среда + клетки»). Концентрация ЛПС в каждом препарате соответствует концентрации клеток $1 \cdot 10^8$ КОЕ/мл. Результаты анализа для препаратов «среда» и «клетки» представлены в табл. 2. Чем меньше значение V_n/V_0 , %, тем больше концентрация ЛПС в препарате.

Из данных, представленных в табл. 2, следует, что ЛПС в препарате «клетки» на поздней стационарной фазе роста значительно меньше, чем в препарате «среда». Значения V_n/V_0 , %, рассчитанные для препарата «среда + «клетки», практически совпадают с таковыми для препарата «среда» (данные не представлены), что подтверждает данный вывод. Кроме того, данные табл. 2 (символ *) показывают, что МАТ 10D9Н действительно не взаимодействует с сальмонеллами серогрупп С и Е, а значит, использование этого МАТ в ИФА сальмонелл в продуктах питания может привести к ложноотрицательным результатам. Напротив, МАТ 5D12А позволяет выявлять все сальмонеллы, включая бактерии редких серогрупп.

На рис. 2 – калибровочные графики конкурентного ИФА сальмонелл, выполненного с использованием МАТ 5D12А в двух концентрациях. Стрелками обозначены границы рабочего диапазона для препаратов «среда», «клетки» и «среда + клетки».

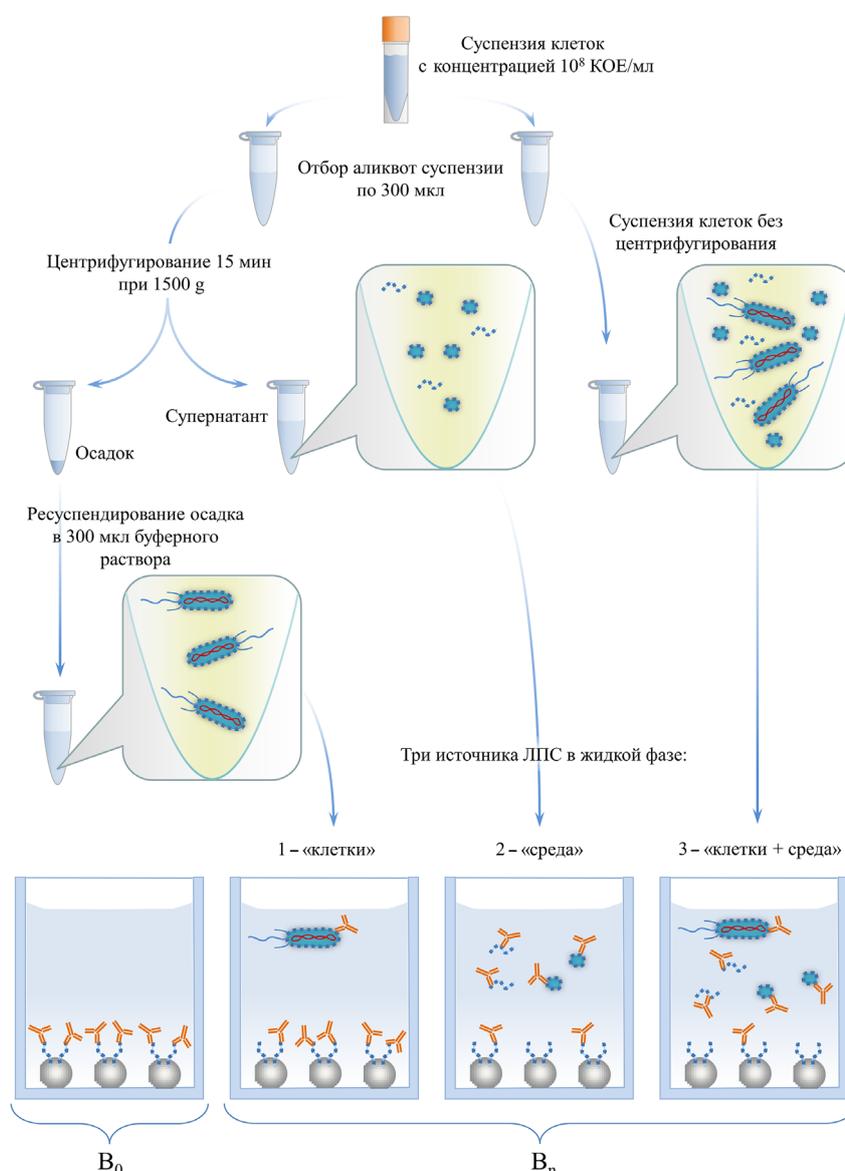


Рис. 1. Схема проведения конкурентного ИФА сальмонелл и пробоподготовки, предшествующей анализу.

1–3 – биоматериал, используемый в качестве источника ЛПС

Fig. 1. Scheme of competitive ELISA of *Salmonella* and sample preparation. 1–3 – biomaterial used as a source of LPS

Таблица 2. Результаты определения ЛПС сальмонелл (B_n/B_0 , %) в препаратах «среда» и «клетки» методом конкурентного ИФАTable 2. Results of detection of *Salmonella* LPS (B_n/B_0 , %) in “medium” and “cell” preparations by competitive ELISA

Сальмонелла (серотип)	Антитело и анализируемый биоматериал			
	MAT 5D12A		MAT 10D9H	
	«среда»	«клетки»	«среда»	«клетки»
<i>S. derby</i> (B)	17,43	70,41	17,05	73,85
<i>S. typhimurium</i> (B)	19,91	83,07	26,97	90,40
<i>S. typhimurium</i> SL7207 (B)	22,93	61,69	32,21	87,22
<i>S. newport</i> (C)	15,34	71,80	93,66*	96,88*
<i>S. enteridis</i> (D)	20,76	72,49	23,98	81,02
<i>S. london</i> (E)	19,13	81,21	94,37*	97,86*

Примечание. * – концентрация ЛПС в каждом препарате «среда» и «клетки» соответствует концентрации бактерий $1 \cdot 10^8$ КОЕ/мл.

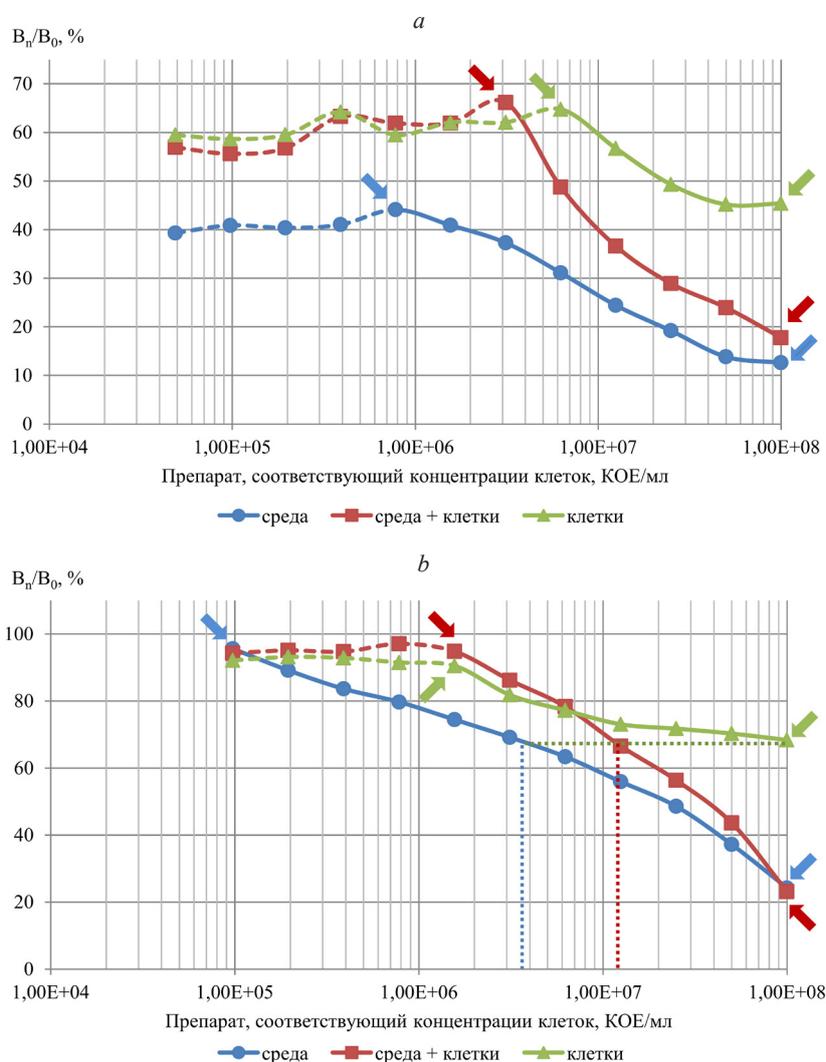


Рис. 2. Калибровочные графики конкурентного ИФА сальмонелл, основанного на использовании МАb 5D12A, специфичного к кору; *a* и *b* – концентрации МАb 5D12A 350 нг/мл и 1500 нг/мл соответственно. Использован штамм VII, *S. typhimurium* SL7207. Стрелками обозначен рабочий диапазон каждого калибровочного графика

Fig. 2. Calibration graphs of competitive ELISA of *Salmonella* based on using core-specific MAб 5D12A; *a* and *b* – concentrations of MAб 5D12A equal to 350 ng/mL and 1500 ng/mL, respectively. *S. typhimurium* SL7207 (strain VII) was used. The arrows indicate the working range of each calibration curve

Рис. 2 иллюстрирует важный методический аспект, а именно необходимость тщательного выбора концентрации МАТ в связи с существенным влиянием этого показателя на параметры калибровочного графика (табл. 3). Оптимальной является концентрация МАТ 5D12A, равная 1500 нг/мл (рис. 2, *b*).

Как видно из данных табл. 3, увеличение концентрации МАТ 5D12A в 4 раза (350–1500 нг/мл в окончательном объеме жидкости в лунке) приводит к смещению нижней границы рабочего диапазона (в 8 и 2 раза для препаратов «среда» и «среда + клетки» соответственно), расширяя его.

Таблица 3. Зависимость параметров калибровочного графика от концентрации МАТ 5D12A
Table 3. Dependence of the parameters of the calibration graph on the concentration of MAb 5D12A

Препарат	Концентрация МАТ 5D12A			
	1500 нг/мл		350 нг/мл	
	нижняя граница рабочего диапазона	V_n/V_0 , %, где V соответствует 10^8 КОЕ/мл	нижняя граница рабочего диапазона	V_n/V_0 , %, где V соответствует 10^8 КОЕ/мл
«среда»	10^5	23	$8 \cdot 10^5$	17,8
«среда + клетки»	$1,5 \cdot 10^6$	24	$3 \cdot 10^6$	12,6

При этом изменяется параметр V_n/V_0 , %, соответствующий минимальной значимой концентрации клеток, в сторону увеличения, что придает нормальный вид калибровочному графику. Так, $V_n/V_0 = 44$ % (рис. 2, *a*) и $V_n/V_0 = 95$ % (рис. 2, *b*) для обозначенных синей стрелкой точек графиков, соответствующих нижней границе рабочего диапазона в случае препарата «среда». По мере увеличения концентрации МАТ 5D12A значение V_0 и параметр V_n/V_0 , %, соответствующий максимальной концентрации биоматериала, увеличиваются незначительно, и это показывает, что выбор оптимальной концентрации МАТ нельзя осуществлять на основе определения только этих критериев, как это делают по традиции.

Аналитическую чувствительность тест-системы (минимальную концентрацию бактериальных клеток (в КОЕ/мл), которую можно обнаружить с помощью данного теста) определяли графически в координатах ось OX (OP_{450}), ось OY – концентрация клеток (КОЕ/мл) с использованием значения $3SD$, рассчитанного, как указано в разделе «Материалы и методы».

Аналитическая чувствительность тест-системы на основе МАТ 5D12A составляет $2,3 \cdot 10^5$ КОЕ/мл и $2,9 \cdot 10^6$ КОЕ/мл для препаратов «среда» и «среда + клетки» соответственно. Сравнение значений позволяет считать, что именно препарат «среда» должен быть использован в качестве анализируемого биоматериала при создании коммерческого набора реагентов для детекции сальмонелл в продуктах питания. Традиционная процедура пробоподготовки при этом дополняется стадией осаждения клеток центрифугированием при ускорении 800 g непосредственно после лишения их жизнеспособности нагреванием.

Корреляция значений двух массивов данных, соответствующих значениям параметра V_n/V_0 , %, рассчитанных для препарата «среда» и для традиционно используемого в коммерческих наборах реагентов препарата «среда + клетки», составляет 94 %. Для сравнения: корреляция аналогичных массивов данных в парах препаратов «среда»–«клетки» и «среда + клетки»–«клетки» составляет 49 и 59 % соответственно. Эти данные являются дополнительным аргументом в пользу использования препарата «среда» в качестве анализируемого биоматериала при создании коммерческого набора реагентов.

На рис. 3 представлены калибровочные графики, полученные с использованием МАТ 10D9H к O-антигену.

Основные параметры калибровочного графика, построенного на основе препарата «среда» при оптимальной концентрации МАТ 10D9H (рис. 3), соответствуют таковым, полученным при оптимальной концентрации МАТ 5D12A (табл. 3). Нижняя граница рабочего диапазона соответствует 10^5 («среда») и $8 \cdot 10^5$ («среда + клетки»).

Аналитическую чувствительность тест-системы на основе МАТ 10D9H определяли экспериментально и рассчитывали подобно тому, как указано выше для МАТ 5D12A. Значения аналитической чувствительности равны $2,4 \cdot 10^5$ КОЕ/мл («среда») и $3,1 \cdot 10^6$ КОЕ/мл («среда + клетки»).

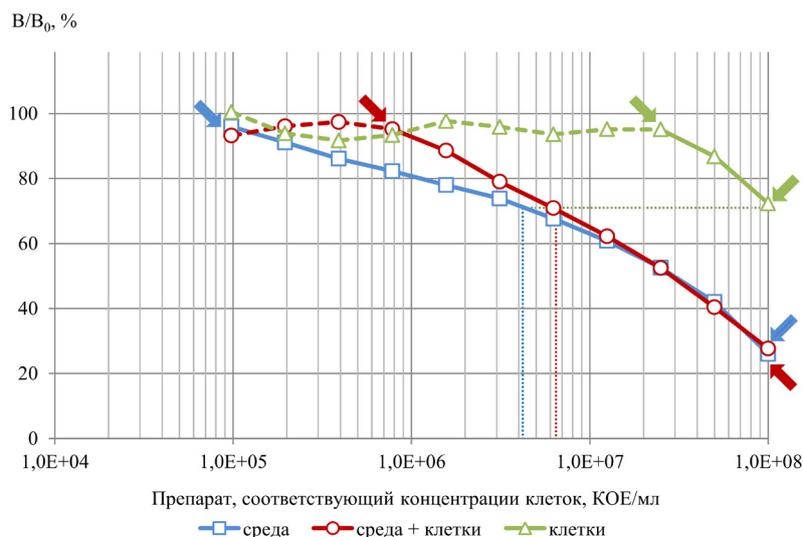


Рис. 3. Калибровочные графики конкурентного ИФА сальмонелл, основанного на использовании МАТ 10D9Н, специфичного О-антигену. Концентрация МАТ 10D9Н – 20 нг/мл. Использован штамм VII, *S. typhimurium* SL7207. Стрелками обозначен рабочий диапазон каждого калибровочного графика

Fig. 3. Calibration graphs of competitive ELISA of *Salmonella* based on using a BSA-LPS conjugate immobilized on the solid phase and MAb 10D9H in the liquid phase. *S. typhimurium* SL7207 (strain VII) was used. MAb 10D9H concentration is 20 ng/ml. The arrows indicate the working range of each calibration curve

После оптимизации условий ИФА возникает возможность количественно сравнить содержание ЛПС в препаратах «среда» и «клетки». С этой целью использовали калибровочные графики, представленные на рис. 2, *b* и рис. 3. Через точку графика, построенного для препарата «клетки», со значением ОХ, равным 10^8 КОЕ/мл, проводили линию, параллельную оси ОХ и пересекающую графики «среда» и «среда + клетки». Из точек пересечения линий с соответствующими графиками опускали перпендикуляры на ось ОХ. Получили значения $3,5 \cdot 10^6$ КОЕ/мл («среда») и $1,1 \cdot 10^7$ КОЕ/мл («среда + клетки») (рис. 2, *b*), а также $4 \cdot 10^6$ («среда») и $7 \cdot 10^6$ («среда + клетки») (рис. 3). Как видим, содержание ЛПС в клетках составляет менее 10 % от такового в среде, что объясняет данные, представленные в табл. 2.

Таким образом, мы создали конструкции двух тест-систем (на основе МАТ 5D12А и МАТ 10D9Н) для количественного определения сальмонелл в продуктах питания посредством конкурентного ИФА ЛПС, секретированного бактериями в среду. Калибровочные графики представлены на рис. 4. Аналитическая чувствительность для каждой из тест-систем соответствует $\sim 10^5$ КОЕ/мл.

Заключение. Методом ИФА с использованием коммерческого МАТ 5D12А (к кору ЛПС) или МАТ 10D9Н (к общему эпитопу О-антигена сальмонелл серогрупп А, В и D) показано, что в культуре сальмонелл, полученной в ходе пробоподготовки, традиционно используемой в коммерческих наборах реагентов для анализа этих бактерий в продуктах питания, ЛПС присутствует главным образом в среде. В клетках содержание ЛПС, способного к взаимодействию с МАТ, составляет менее 10 % от такового в среде.

Установлено, что дополнение стандартной процедуры пробоподготовки центрифугированием с целью отделения бактерий от среды и последующий анализ именно среды позволяют улучшить параметры тест-системы, а именно расширить рабочий диапазон в сторону более низких концентраций ЛПС и повысить аналитическую чувствительность.

Показано, что иммобилизация в лунках микропланшетного иммуносорбента конъюгата БСА-ЛПС позволяет получить более однородное покрытие, чем иммобилизация ЛПС как такового. Ориентация ЛПС на твердой фазе является рН-зависимой.

Созданы конструкции двух тест-систем для детекции сальмонелл в продуктах питания методом конкурентного ИФА ЛПС, секретированного бактериями в культуральную среду. В каждой

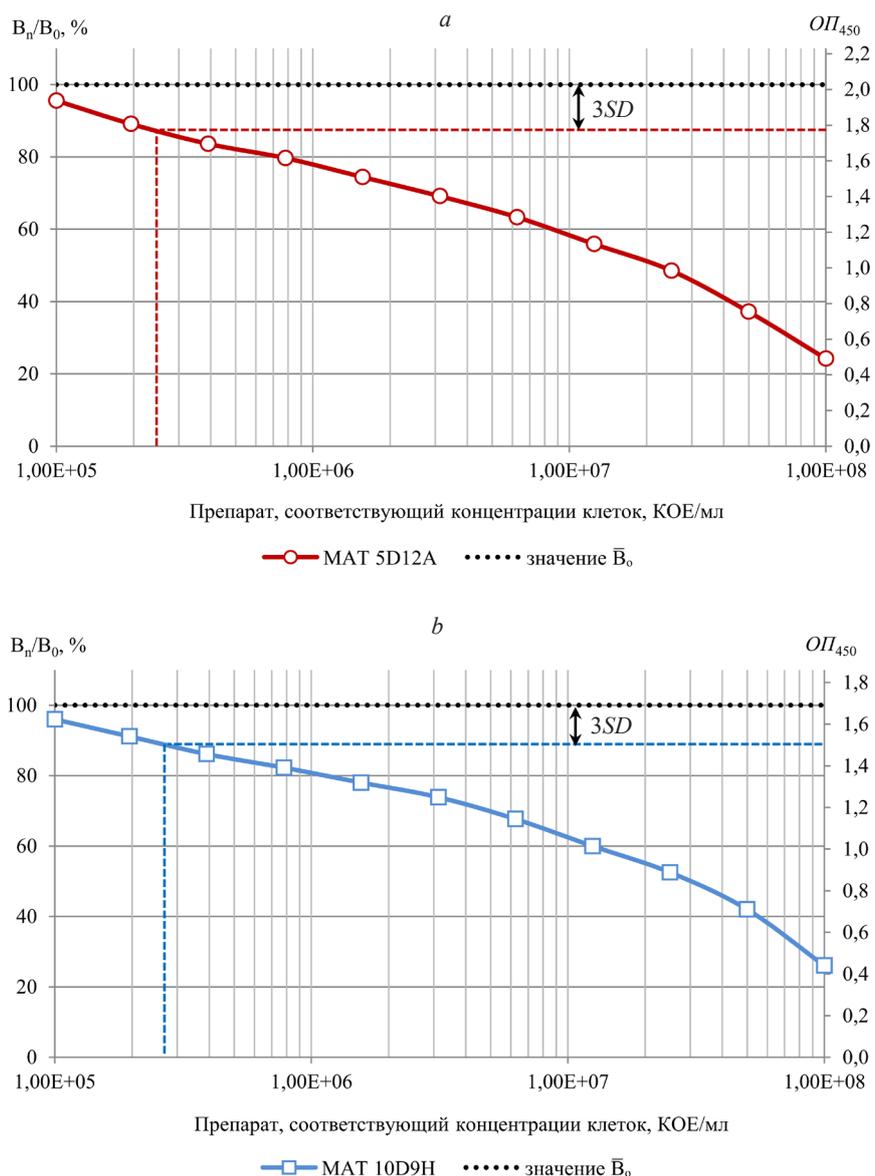


Рис. 4. Калибровочные графики конкурентного ИФА ЛПС, секретированного бактериями в культуральную среду.

Использовали иммобилизованный на твердой фазе конъюгат БСА-ЛПС, находящиеся в жидкой фазе MAT 5D12A (a) или MAT 10D9H (b) и *S. typhimurium* SL7207 (VII)

Fig. 4. Calibration graphs of competitive ELISA for LPS secreted by bacteria into the culture medium. We used the BSA-LPS conjugate immobilized on the solid phase, MAб 5D12A (a) or MAб 10D9H (b) in the liquid phase, and *S. typhimurium* SL7207 (VII)

тест-системе на твердой фазе иммобилизован конъюгат БСА-ЛПС, а пробоподготовка включает осаждение клеток бактерий центрифугированием. Тест-системы отличаются антителами (MAT 5D12A, специфичное к кору ЛПС, или MAT 10D9H, специфичное к общему эпитопу О-антигена сальмонелл серогрупп А, В и D), находящимися в жидкой фазе. Чувствительность анализа для каждой из тест-систем соответствует 10^5 КОЕ/мл. Тест-система на основе MAT 5D12A имеет преимущество, а именно позволяет детектировать все сальмонеллы независимо от серотипа.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект РНФ-БРФФИ X23РНФ-185).

Acknowledgements. This work was financially supported by the Belarusian Republican Foundation for Basic Research (RNF-BRFFR project X23RNF-185).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Characteristics of non-typhoidal *Salmonella* gastroenteritis in Taiwanese children: a 9-year period retrospective medical record review / Y.-T. Hung, C.-J. Lay, C.-L. Wang, M. Koo // *Journal of Infection and Public Health*. – 2017. – Vol. 10, N 5. – P. 518–521. <https://doi.org/10.1016/j.jiph.2016.09.018>
2. Antibiotic resistance in *Salmonella* spp. isolated from poultry: A global overview / R. E. Castro-Vargas, M. P. Herrera-Sánchez, R. Rodríguez-Hernández, I. S. Rondón-Barragán // *Veterinary World*. – 2020. – Vol. 13, N 10. – P. 2070–2084. <https://doi.org/10.14202/vetworld.2020.2070-2084>
3. Sources and risk factors for contamination, survival, persistence, and heat resistance of *Salmonella* in low-moisture foods / R. Podolak, E. Enache, W. Stone [et al.] // *Journal of Food Protection*. – 2010. – Vol. 73, N 10. – P. 1919–1936. <https://doi.org/10.4315/0362-028x-73.10.1919>
4. Epidemiology, pathogenesis, genosero-typing, antimicrobial resistance, and prevention and control of non-typhoidal *Salmonella* serovars / G. Arya, R. Holtzlander, J. Robertson [et al.] // *Current Clinical Microbiology Reports*. – 2017. – Vol. 4. – P. 43–53. <https://doi.org/10.1007/s40588-017-0057-7>
5. *Salmonella* nomenclature / F. W. Brenner, R. G. Villar, F. J. Angulo [et al.] // *Journal of clinical microbiology*. – 2000. – Vol. 38, N 7. – P. 2465–2467. <https://doi.org/10.1128/jcm.38.7.2465-2467.2000>
6. Popoff, M. Y. Antigenic formulas of the *Salmonella* serovars, 7th revision / M. Y. Popoff, L. Le Minor // World Health Organization, Collaborating Centre of Reference and Research on *Salmonella* Institute Pasteur. – Paris, France. 1997.
7. Characteristic diversity and antimicrobial resistance of *Salmonella* from gastroenteritis / Y. Luo, W. Yi, Y. Yao [et al.] // *The Journal of Infection and Chemotherapy*. – 2018. – Vol. 24, N 4. – P. 251–255. <https://doi.org/10.1016/j.jiac.2017.11.003>
8. Advancement in *Salmonella* detection methods: from conventional to electrochemical-based sensing detection / M. S. Awang, Y. Bustami, H. H. Hamzah [et al.] // *Biosensors*. – 2021. – Vol. 11, N 9. – Art. 346. <https://doi.org/10.3390/bios11090346>
9. NF VALIDATION, Validation of alternative analysis methods – application to foodstuffs (NF102). List valid on 11th March-2024. – Iss. on 18-12-2023. – 77 p. – URL: <https://nf-validation.afnor.org/en/wp-content/uploads/sites/2/2024/03/List-valid-2024-03-11.pdf> (date of access: 09.12.2024).
10. Cox, N. A. *Salmonella* methodology update / N. A. Cox // *Poultry Science*. – 1988. – Vol. 67, N 6. – P. 921–927. <https://doi.org/10.3382/ps.0670921>
11. Detecting non-typhoid *Salmonella* in humans by ELISAs: a literature review / K. G. Kuhn, G. Falkenhorst, T. N. Ceper [et al.] // *Journal of Medical Microbiology*. – 2012. – Vol. 61, N 1. – P. 1–7. <https://doi.org/10.1099/jmm.0.034447-0>
12. Production of recombinant flagellin to develop ELISA-based detection of *Salmonella enteritidis* / S. A. Mirhosseini, A. A. Fooladi, J. Amani, H. Sedighian // *Brazilian journal of microbiology*. – 2017. – Vol. 48, N 4. – P. 774–781. <https://doi.org/10.1016/j.bjm.2016.04.033>
13. Gold nanoparticle-based strip sensor for multiple detection of twelve *Salmonella* strains with a genus-specific lipopolysaccharide antibody / W. Wang, L. Liu, S. Song [et al.] // *Science China Materials*. – 2016. – Vol. 59. – P. 665–674. <https://doi.org/10.1007/s40843-016-5077-0>
14. Monoclonal antibody-based cross-reactive sandwich ELISA for the detection of *Salmonella* spp. in milk samples / X. Wu, W. Wang, L. Liu [et al.] // *Analytical Methods*. – 2015. – Vol. 7, N 21. – P. 9047–9053. <https://doi.org/10.1039/c5ay01923k>
15. The discovery of the role of outer membrane vesicles against bacteria / S. Combo, S. Mendes, K. M. Nielsen [et al.] // *Biomedicines*. – 2022. – Vol. 10, N 10. – Art. 2399. <https://doi.org/10.3390/biomedicines10102399>
16. Schwegheimer, C. Envelope control of outer membrane vesicle production in Gram-negative bacteria / C. Schwegheimer, C. J. Sullivan, M. J. Kuehn // *Biochemistry*. – 2013. – Vol. 52, N 18. – P. 3031–3040. <https://doi.org/10.1021/bi400164t>
17. Schwegheimer, C. Outer-membrane vesicles from Gram-negative bacteria: biogenesis and functions / C. Schwegheimer, M. J. Kuehn // *Nature Reviews Microbiology*. – 2015. – Vol. 13. – P. 605–619. <https://doi.org/10.1038/nrmicro3525>
18. Outer membrane vesicles of Gram-negative bacteria: an outlook on biogenesis / E. D. Avila-Calderón, M. D. S. Ruiz-Palma, Ma. G. Aguilera-Arreola [et al.] // *Frontiers in Microbiology*. – 2021. – Vol. 12. – Art. 557902. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.557902>
19. A novel mechanism for the biogenesis of outer membrane vesicles in Gram-negative bacteria / S. Roier, F. G. Zingl, F. Cakar [et al.] // *Nature Communications*. – 2016. – Vol. 7. – Art. 10515. <https://doi.org/10.1038/ncomms10515>
20. Extraction, purification and characterization of lipopolysaccharide from *Escherichia coli* and *Salmonella typhi* / S. Re-zania, N. Amirmozaffari, B. Tabarraei [et al.] // *Avicenna Journal of Medical Biotechnology*. – 2011. – Vol. 3, N 1. – P. 3–9.
21. Al-AAlim, A. M. Extraction and purification of lipopolysaccharide from *Escherichia coli* (local isolate) and study its pyrogenic activity / A. M. Al-AAlim, A. A. Al-ledani, M. A. Hamad // *Iraqi Journal of Veterinary Sciences*. – 2022. – Vol. 36, N 1. – P. 45–51. <https://doi.org/10.33899/ijvs.2021.128963.1614>
22. Westphal, O. Bacterial lipopolysaccharides extraction with phenol-water and further applications of the procedure / O. Westphal, K. Jann // *Methods in Carbohydrate Chemistry*. – 1965. – Vol. 5. – P. 83–91.
23. Sarmikasoglou, E. Ruminant lipopolysaccharides analysis: uncharted waters with promising signs / E. Sarmikasoglou, A. P. Faciola // *Animals (Basel)*. – 2021. – Vol. 11, N 1. – Art. 195. <https://doi.org/10.3390/ani11010195>
24. Количественное определение липополисахарида *B. pertussis* / М. Р. Назиров, А. В. Поддубиков, В. Г. Кукес [и др.] // Бюллетень экспериментальной биологии и медицины. – 2021. – Т. 172, № 12. – С. 716–718.
25. Morphology, size distribution, and aggregate structure of lipopolysaccharide and lipid A dispersions from enterobacterial origin / W. Richter, V. Vogel, J. Howe [et al.] // *Innate Immunity*. – 2010. – Vol. 17, N 5. – P. 427–438. <https://doi.org/10.1177/1753425910372434>

26. Heterogeneity of lipopolysaccharide as source of variability in bioassays and LPS-binding proteins as remedy / A. C. Fux, C. C. Melo, S. Michelini [et al.] // *International Journal of Molecular Sciences*. – 2023. – Vol. 24. – Art. 8395. <https://doi.org/10.3390/ijms24098395>
27. Gorman, A. Lipopolysaccharide structure and the phenomenon of low endotoxin recovery / A. Gorman, A. P. Golovanov // *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*. – 2022. – Vol. 180. – P. 289–230. <https://doi.org/10.1016/j.ejpb.2022.10.006>
28. Influence of the supramolecular structure of free lipid A on its biological activity / K. Brandenburg, H. Mayer, M. N. J. Koch [et al.] // *European Journal of Biochemistry*. – 1993. – Vol. 218. – P. 555–563. <https://doi.org/10.1111/j.1432-1033.1993.tb18409.x>
29. Masking of endotoxin in surfactant samples: Effects on *Limulus*-based detection systems / J. Reich, P. Lang, H. Grallert, H. Motschmann // *Biologicals*. – 2016. – Vol. 44, N 5. – P. 417–422. <https://doi.org/10.1016/j.biologicals.2016.04.012>
30. Low endotoxin recovery – masking of naturally occurring endotoxin / J. Reich, F. A. Weyer, H. Tamura [et al.] // *International Journal of Molecular Sciences*. – 2019. – Vol. 20, N 4. – Art. 838. <https://doi.org/10.3390/ijms20040838>
31. Biological activity of masked endotoxin / H. Schwarz, J. Gornicec, T. Neuper [et al.] // *Scientific Reports*. – 2017. – Vol. 7. – Art. 44750. <https://doi.org/10.1038/srep44750>
32. Lerouge, I. O-antigen structural variation: mechanisms and possible roles in animal/plant microbe interactions / I. Lerouge, J. Vanderleyden // *FEMS Microbiology Reviews*, – 2001. – Vol. 26, N 1. – P. 17–47. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.2002.tb00597.x>
33. Whitfield, C. Lipopolysaccharide O-antigens – bacterial glycans made to measure / C. Whitfield, M. W. Danielle, S. D. Kelly // *Journal of Biological Chemistry*. – 2020. – Vol. 295, N 31. – P. 10593–10609. <https://doi.org/10.1074/jbc.rev120.009402>
34. Rice, A. Atomistic scale effects of lipopolysaccharide modifications on bacterial outer membrane defenses / A. Rice, J. Wereszczynski // *Biophysical Journal*. – 2018. – Vol. 114, N 6. – P. 1389–1399. <https://doi.org/10.1016/j.bpj.2018.02.006>

References

1. Hung Y.-T., Lay C.-J., Wang C.-L., Koo M. Characteristics of non-typhoidal *Salmonella* *astroenteritis* in Taiwanese children: a 9-year period retrospective medical record review. *Journal of Infection and Public Health*, 2017, vol. 10, no. 5, pp. 518–521. <https://doi.org/10.1016/j.jiph.2016.09.018>
2. Castro-Vargas R. E., Herrera-Sánchez M. P., Rodríguez-Hernández R., Rondón-Barragán I. S. Antibiotic resistance in *Salmonella* spp. Isolated from poultry: A global overview. *Veterinary World*, 2020, vol. 13, no. 10, pp. 2070–2084. <https://doi.org/10.14202/vetworld.2020.2070-2084>
3. Podolak R., Enache E., Stone W., Black D. G., Elliott P. H. Sources and risk factors for contamination, survival, persistence, and heat resistance of *Salmonella* in low-moisture foods. *Journal of Food Protection*, 2010, vol. 73, no. 10, pp. 1919–1936. <https://doi.org/10.4315/0362-028x-73.10.1919>
4. Arya G., Holtslander R., Robertson J., Yoshida C., Harris J., Parmley J., Nichani A., Johnson R., Poppe C. Epidemiology, pathogenesis, genoserotyping, antimicrobial resistance, and prevention and control of non-typhoidal *Salmonella* serovars. *Current Clinical Microbiology Reports*, 2017, vol. 4, pp. 43–53. <https://doi.org/10.1007/s40588-017-0057-7>
5. Brenner F. W., Villar R. G., Angulo F. J., Tauxe R., Swaminathan B. *Salmonella* nomenclature. *Journal of clinical microbiology*. 2000, vol. 38, no. 7, pp. 2465–2467. <https://doi.org/10.1128/jcm.38.7.2465-2467.2000>
6. Popoff M. Y., Le Minor L. *Antigenic Formulas of the Salmonella Serovars, 7th Revision, 1997*. W. H. O. Collaborating Centre of Reference and Research on Salmonella Institute Pasteur, Paris, France.
7. Luo Y., Yi W., Yao Y., Zhu N., Qin P. Characteristic diversity and antimicrobial resistance of *Salmonella* from gastroenteritis. *The Journal of Infection and Chemotherapy*, 2018, vol. 24, no. 4, pp. 251–255. <https://doi.org/10.1016/j.jiac.2017.11.003>
8. Awang M. S., Bustami Y., Hamzah H. H., Zambry N. S., Najib M. A., Khalid M. F., Aziah I., Manaf A. A. Advancement in *Salmonella* detection methods: from conventional to electrochemical-based sensing detection. *Biosensors*, 2021, vol. 11, no. 9, art. 346. <https://doi.org/10.3390/bios11090346>
9. NF VALIDATION, Validation of alternative analysis methods – application to foodstuffs (NF102). List valid on 11th March-2024. Iss. on 18-12-2023. 77 p. Available at: <https://nf-validation.afnor.org/en/wp-content/uploads/sites/2/2024/03/List-valid-2024-03-11.pdf> (accessed 09.12.2024).
10. Cox N. A. *Salmonella* methodology update. *Poultry Science*, 1988, vol. 67, no. 6, pp. 921–927. <https://doi.org/10.3382/ps.0670921>
11. Kuhn K. G., Falkenhorst G., Ceper T. H., Dalby T., Ethelberg S., Mølbak K., Krogfelt K. A. Detecting non-typhoid *Salmonella* in humans by ELISAs: a literature review. *Journal of Medical Microbiology*, 2012, vol. 61, no. 1, pp. 1–7. <https://doi.org/10.1099/jmm.0.034447-0>
12. Mirhosseini S. A., Fooladi A. A., Amani J., Sedighian H. Production of recombinant flagellin to develop ELISA-based detection of *Salmonella enteritidis*. *Brazilian journal of microbiology*, 2017, vol. 48, no. 4, pp. 774–781. <https://doi.org/10.1016/j.bjm.2016.04.033>
13. Wang W., Liu L., Song S., Xu L., Kuang H., Zhu J., Xu C. Gold nanoparticle-based strip sensor for multiple detection of twelve *Salmonella* strains with a genus-specific lipopolysaccharide antibody. *Science China Materials*, 2016, vol. 59, pp. 665–674. <https://doi.org/10.1007/s40843-016-5077-0>
14. Wu X., Wang W., Liu L., Kuang H., Xu C. Monoclonal antibody-based cross-reactive sandwich ELISA for the detection of *Salmonella* spp. in milk samples. *Analytical Methods*, 2015, vol. 7, no. 21, pp. 9047–9053. <https://doi.org/10.1039/c5ay01923k>

15. Combo S., Mendes S., Nielsen K. M., da Silva G. J., Domingues S. The discovery of the role of outer membrane vesicles against bacteria. *Biomedicines*, 2022, vol. 10, no. 10, art. 2399. <https://doi.org/10.3390/biomedicines10102399>
16. Schwegheimer C., Sullivan C. J., Kuehn M. J. Envelope control of outer membrane vesicle production in Gram-negative bacteria. *Biochemistry*, 2013, vol. 52, no. 18, pp. 3031–3040. <https://doi.org/10.1021/bi400164t>
17. Schwegheimer C., Kuehn M. J. Outer-membrane vesicles from Gram-negative bacteria: biogenesis and functions. *Nature Reviews Microbiology*, 2015, vol. 13, pp. 605–619. <https://doi.org/10.1038/nrmicro3525>
18. Avila-Calderón E. D., Ruiz-Palma M. D. S., Aguilera-Arreola Ma. G., Velázquez-Guadarrama N., Ruiz E. A., Gomez-Lunar Z., Witonsky S., Contreras-Rodríguez A. Outer membrane vesicles of Gram-negative bacteria: an outlook on biogenesis. *Frontiers in Microbiology*, 2021, vol. 12, art. 557902. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.557902>
19. Roier S., Zingl F. G., Cakar F., Durakovic S., Kohl P., Eichmann T. O., Klug L., Gadermaier B., Weinzerl K., Prassl R., Lass A., Daum G., Reidl G., Feldman M. F., Schild S. A novel mechanism for the biogenesis of outer membrane vesicles in Gram-negative bacteria. *Nature Communications*, 2016, vol. 7, art. 10515. <https://doi.org/10.1038/ncomms10515>
20. Rezania S., Amirmozaffari N., Tabarraei B., Jeddi-Tehrani M., Zarei O., Alizadeh R., Masjedian F., Zarnani A. H. Extraction, purification and characterization of lipopolysaccharide from *Escherichia coli* and *Salmonella typhi*. *Avicenna Journal of Medical Biotechnology*, 2011, vol. 3, no. 1, pp. 3–9.
21. Al-Aalim A. M., Al-Iedani A. A., Hamad M. A. Extraction and purification of lipopolysaccharide from *Escherichia coli* (local isolate) and study its pyrogenic activity. *Iraqi Journal of Veterinary Sciences*, 2022, vol. 36, no. 1, pp. 45–51. <https://doi.org/10.33899/ijvs.2021.128963.1614>
22. Westphal O., Jann K. Bacterial lipopolysaccharides extraction with phenol-water and further applications of the procedure. *Methods in Carbohydrate Chemistry*, 1965, vol. 5, pp. 83–91.
23. Sarmikasoglou E., Faciola A. P. Ruminant lipopolysaccharides analysis: uncharted waters with promising signs. *Animals (Basel)*, 2021, vol. 11, no. 1, art. 195. <https://doi.org/10.3390/ani11010195>
24. Nazirov M. R., Poddubikov A. V., Kukes V. G., Sidorov N. G., Parfenova O. K. Quantitative determination of *B. pertussis* lipopolysaccharide. *Byulleten' eksperimental'noi biologii i meditsiny* [Bulletin of Experimental Biology and Medicine], 2021, vol. 12, no. 12, pp. 716–718 (in Russian).
25. Richter W., Vogel V., Steiniger F., Brauser A., Koch M. H. J., Roessle M., Gutschmann T., Garidel P., Mäntele W., Brandenburg K. Morphology, size distribution, and aggregate structure of lipopolysaccharide and lipid A dispersions from enterobacterial origin. *Innate Immunity*, 2010, vol. 17, no. 5, pp. 427–438. <https://doi.org/10.1177/1753425910372434>
26. Fux A. C., Melo C. C., Michelini S., Swartzwelter B. J., Neusch A., Italiani P., Himly M. Heterogeneity of lipopolysaccharide as source of variability in bioassays and LPS-binding proteins as remedy. *International Journal of Molecular Sciences*, 2023, vol. 24, art. 8395. <https://doi.org/10.3390/ijms24098395>
27. Gorman A., Golovanov A. P. Lipopolysaccharide structure and the phenomenon of low endotoxin recovery. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 2022, vol. 180, pp. 289–230. <https://doi.org/10.1016/j.ejpb.2022.10.006>
28. Brandenburg K., Mayer H., Koch M. N. J., Weckesser J., Rietschel E. T., Seydel U. Influence of the supramolecular structure of free lipid A on its biological activity. *European Journal of Biochemistry*, 1993, vol. 218, pp. 555–563. <https://doi.org/10.1111/j.1432-1033.1993.tb18409.x>
29. Reich J., Lang P., Grallert H., Motschmann H. Masking of endotoxin in surfactant samples: Effects on *Limulus*-based detection systems. *Biologicals*, 2016, vol. 44, no. 5, pp. 417–422. <https://doi.org/10.1016/j.biologicals.2016.04.012>
30. Reich J., Weyer F. A., Tamura H., Nagaoka I., Motschmann H. Low endotoxin recovery – masking of naturally occurring endotoxin. *International Journal of Molecular Sciences*, 2019, vol. 20, no. 4, art. 838. <https://doi.org/10.3390/ijms20040838>
31. Schwarz H., Gornicec J., Neuper T., Parigiani M. A., Wallner M., Duschl A., Horejs-Hoek J. Biological activity of masked endotoxin. *Scientific Reports*, 2017, vol. 7, art. 44750. <https://doi.org/10.1038/srep44750>
32. Lerouge I., Vanderleyden J. O-antigen structural variation: mechanisms and possible roles in animal/plant microbe interactions. *FEMS Microbiology Reviews*, 2001, vol. 26, no. 1, pp. 17–47. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.2002.tb00597.x>
33. Whitfield C., Danielle M. W., Kelly S. D. Lipopolysaccharide O-antigens – bacterial glycans made to measure. *Journal of Biological Chemistry*, 2020, vol. 295, no. 31, pp. 10593–10609. <https://doi.org/10.1074/jbc.rev120.009402>
34. Rice A., Wereszczynski J. Atomistic scale effects of lipopolysaccharide modifications on bacterial outer membrane defenses. *Biophysical Journal*, 2018, vol. 114, no. 6, pp. 1389–1399. <https://doi.org/10.1016/j.bpj.2018.02.006>

Информация об авторах

Киселева Елена Павловна – канд. хим. наук, вед. науч. сотрудник. Институт биоорганической химии НАН Беларуси (ул. Академика Купревича, 5/2, 220141, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: epkiseleva@iboch.by

Михайлопуло Константин Игоревич – ст. науч. сотрудник. Институт биоорганической химии НАН Беларуси (ул. Академика Купревича, 5/2, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: k.mikhailopulo@iboch.by

Свиридов Олег Васильевич – д-р хим. наук, профессор, заведующий лабораторией. Институт биоорганической химии НАН Беларуси (ул. Академика Купревича, 5/2, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: sviridov@iboch.by

Information about the authors

Elena P. Kiseleva – Ph. D. (Chem.), Leading Researcher. Institute of Bioorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (5/2, Academician Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: epkiseleva@iboch.by

Konstantin I. Mikhailopulo – Senior Researcher. Institute of Bioorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (5/2, Academician Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: k.mikhailopulo@iboch.by

Oleg V. Sviridov – D. Sc. (Chem.), Professor, Head of the Laboratory. Institute of Bioorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (5/2, Academician Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sviridov@iboch.by

ISSN 1029-8940 (Print)
 ISSN 2524-230X (Online)
 УДК 636.4.033:575.174.015.3
<https://doi.org/10.29235/1029-8940-2025-70-1-69-79>

Поступила в редакцию 11.07.2024
 Received 11.07.2024

В. Н. Кипень, Е. В. Снытков, М. Е. Михайлова

Институт генетики и цитологии НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

УСТАНОВЛЕНИЕ ПОРОДНОГО СОСТАВА СВИНЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ KASP

Аннотация. Установлен высокий дифференцирующий потенциал семи полиморфных вариантов для различения свиней пород йоркшир, белорусская крупная белая и белорусская мясная, разводимых в Беларуси. Для свиней породы йоркшир предложена модель, включающая три однонуклеотидных полиморфизма – Chr.6:g.121005974A>G, Chr.17:g.15827832G>T, Chr.10:g.30081932A>G; для свиней породы белорусская крупная белая – Chr.6:g.121005974A>G, Chr.3:g.118879246C>G, Chr.7:g.52269732A>G; для свиней породы белорусская мясная – Chr.8:g.47482649G>T, Chr.9:g.48882095A>G, Chr.10:g.30081932A>G. Модели характеризуются высокими значениями точности, специфичности и чувствительности. Подход к дифференциации пород свиней основан на технологии конкурентной аллель-специфической ПЦР.

Ключевые слова: *Sus scrofa domesticus*, йоркшир, белорусская крупная белая, белорусская мясная, однонуклеотидный полиморфизм, дифференциация, конкурентная аллель-специфическая ПЦР, генотипирование *in silico*

Для цитирования: Кипень, В. Н. Установление породного состава свиней с использованием технологии KASP / В. Н. Кипень, Е. В. Снытков, М. Е. Михайлова // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя біялагічных навук. – 2025. – Т. 70, № 1. – С. 69–79. <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2025-70-1-69-79>

Vyacheslav N. Kipen', Evgenij V. Snytkov, Mariya E. Mikhailova

Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

ESTABLISHING THE BREED COMPOSITION OF PIGS USING KASP TECHNOLOGY

Abstract. A high differentiating potential of seven polymorphic variants has been identified to distinguish between Yorkshire, Belarusian Large White and Belarusian Meat pig breeds bred in Belarus. For the Yorkshire pig breed, a model is proposed including three single nucleotide polymorphisms – Chr.6:g.121005974A>G, Chr.17:g.15827832G>T, Chr.10:g.30081932A>G; for the Belarusian Large White pig breed – Chr.6:g.121005974A>G, Chr.3:g.118879246C>G, Chr.7:g.52269732A>G; for the Belarusian Meat pig breed – Chr.8:g.47482649G>T, Chr.9:g.48882095A>G, Chr.10:g.30081932A>G. The models demonstrate high accuracy, specificity, and sensitivity values. The approach to differentiating pig breeds is based on the technology of competitive allele-specific PCR.

Keywords: *Sus scrofa domesticus*, Yorkshire, Belarusian Large White, Belarusian Meat, single nucleotide polymorphism, differentiation, competitive allele-specific PCR (KASP), *in silico* genotyping

For citation: Kipen' V. N., Snytkov E. V., Mikhailova M. E. Establishing the breed composition of pigs using KASP technology. *Vesti Natsyonal'nai akademii nauk Belarusi. Seriya biyalagichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological series*, 2025, vol. 70, no. 1, pp. 69–79 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2025-70-1-69-79>

Введение. Основная цель селекции сельскохозяйственных животных – сохранение биоразнообразия и улучшение породных качеств. Это достигается несколькими путями: тщательный подбор пар для скрещивания, чтобы получить потомство с желаемыми признаками; поддержание различных линий внутри породы, каждая из которых обладает своими уникальными преимуществами; скрещивание линий для получения потомства, которое сочетает в себе лучшие качества обеих родительских линий [1]. Такой подход позволяет использовать генетический потенциал внутри породы для изменения ее характеристик в заданном направлении, например, для улучшения мясной продуктивности или устойчивости к болезням. Помимо этого, чистопородное разведение заводских пород обеспечивает получение высококачественного племенного материала для товарного животноводства.

Однонуклеотидные полиморфизмы (Single Nucleotide Polymorphism, SNP) – это небольшие генетические вариации, которые широко распространены в геноме. Их анализ позволяет вы-

явить генетическую разнородность между видами, породами и линиями животных. SNP являются ценным материалом для контроля происхождения животных и определения степени их генетических различий, а также дают возможность контролировать генетически обусловленные особенности, связанные с продуктивностью или устойчивостью к болезням. Анализ SNP в настоящее время автоматизирован и высокотехнологичен, что позволяет быстро и эффективно исследовать большое количество образцов. Более того, использование технологии конкурентной аллель-специфической ПЦР (competitive allele-specific PCR, KASP) делает анализ SNP доступным для небольших лабораторий или фермерских хозяйств. Анализ SNP для оценки генетического разнообразия пород свиней отражен в многочисленных исследованиях [2–18].

Как правило, исследователи не говорят о дифференцирующем потенциале конкретного SNP в контексте различения пород свиней, однако в настоящее время в Национальном центре биотехнологической информации (National Center for Biotechnology Information, NCBI) в открытом доступе находится довольно много материалов относительно полногеномных секвенсных проектов для вида *S. scrofa*, характеризующихся достаточной глубиной прочтения для определения генотипа *in silico* с использованием методов биоинформатики. Самостоятельно проведенный биоинформатический анализ этих данных позволяет определить локусы для молекулярно-генетических исследований.

В Беларуси разводятся следующие породы свиней: белорусская крупная белая (БКБ), белорусская мясная (БМ), йоркшир, ландрас, дюрок и др. Основная доля поголовья приходится на долю БКБ, БМ и йоркшира.

Йоркширских свиней впервые начали разводить в графстве Йоркшир (Англия) в середине XIX в. Порода была выведена путем скрещивания местных свиней с автохтонными свиньями из Италии и Китая. Представители породы имеют белый окрас, они довольно крупные: вес хряков достигает 300–400 кг, вес свиноматок – 250–350 кг. Экстерьерные характеристики: голова длинная и узкая, с прямым профилем, уши небольшие, стоячие, тело длинное и мускулистое, с широкой спиной и глубоким окороком. Мясо йоркширских свиней характеризуется как диетическое, так как имеет небольшое количество жира. Выход мяса высокий по сравнению с другими породами свиней. Йоркширская порода популярна во многих странах мира, где она используется для производства высококачественного мяса и при скрещивании с другими породами для улучшения качества мяса.

Порода свиней БКБ была выведена в Беларуси в 1960-х гг. путем скрещивания местных пород с крупными белыми породами из Великобритании и Дании. Экстерьерные характеристики: масть белая, голова длинная и узкая, с прямым профилем, уши небольшие, стоячие, тело длинное и мускулистое, с широкой спиной и глубоким окороком. Свиньи довольно крупные: вес хряков достигает 350–400 кг, вес свиноматок – 250–300 кг. Мясо отличается нежным, сочным вкусом и небольшим количеством жира, выход мяса высокий. БКБ – одна из наиболее популярных пород свиней как в Беларуси, так и в других странах, она часто используется в скрещиваниях с другими породами для улучшения мясных характеристик.

Порода свиней БМ выведена в Беларуси путем скрещивания пород ландрас, крупная белая и дюрок. Экстерьерные характеристики: крупное, гармонично развитое тело, длинная и широкая голова с прямым профилем, широкая глубокая грудь, длинная прямая спина, окорока округлые, хорошо развиты, шерсть белая, кожа розовая, уши средние, слабо подвижные, направленные вперед. Средняя масса тела хряков составляет 320–340 кг, свиноматок – 220–240 кг. Свиньи этой породы обладают высокой мясностью (мясо-сальный тип), мясо содержит небольшое количество внутримышечного жира. БМ адаптирована к климатическим условиям Беларуси, обладает высокой устойчивостью к болезням, хорошей конверсией корма, стрессоустойчивостью.

Таким образом, цель данной работы – оценить дифференцирующий потенциал SNP для различения свиней пород йоркшир, БКБ и БМ между собой, а также с другими породами (дюрок, ландрас), представленными в Беларуси.

Материалы и методы исследования. *Биологические образцы.* В исследование включены следующие породы свиней: БКБ (49 животных), БМ (46 животных), дюрок (46 животных), ландрас (110 животных), йоркшир (77 животных). Суммарно было проанализировано 328 образцов ушных выщипов свиней. Оценка породной принадлежности осуществлялась сотрудниками селекционно-гибридных центров.

Выделение ДНК. ДНК из образцов ушных выщипов выделяли с использованием набора ДНК-сорб-Б (ФБУН ЦНИИ Эпидемиологии Роспотребнадзора, Россия) в соответствии с рекомендациями производителя.

KASP. Определение генотипа по SNP (Sscrofa11.1, GCF_000003025.6): rs332196135 (AX-116218162, Chr.3:118879246C>G), rs81322965 (AX-116298633, Chr.6:121005974A>G), rs322056535 (AX-116735790, Chr.7:52269732A>G), rs80967182 (AX-116690009, Chr.7:106301845A>G), rs81333725 (AX-116346555, Chr.8:47482649G>T), rs80789418 (AX-116379068, Chr.9:48882095A>G), rs319844693 (AX-116406049, Chr.10:30081932A>G), rs80859281 (AX-116519407, Chr.14:99099156C>T), rs337649492 (AX-116542446, Chr.15:58295974A>C), rs80855833 (AX-116581153, Chr.17:15827832G>T) – осуществляли с использованием технологии, основанной на конкурентной аллель-специфической ПЦР (KASP). Для анализа использовали KASP Assay mix (KASP by Design, KBD) и KASP Master mix (LGC Biosearch Technologies, Великобритания; ООО «Максим Медикал», РФ). ПЦР осуществляли в объеме 10 мкл, использовали амплификатор Applied Biosystems QuantStudio 5 Real-Time PCR System (Thermo Fisher Scientific, США). На рис. 1 представлены 2D-графики аллельной дискриминации для SNP rs332196135, rs81322965, rs322056535, rs81333725, rs80789418, rs319844693, rs80855833.

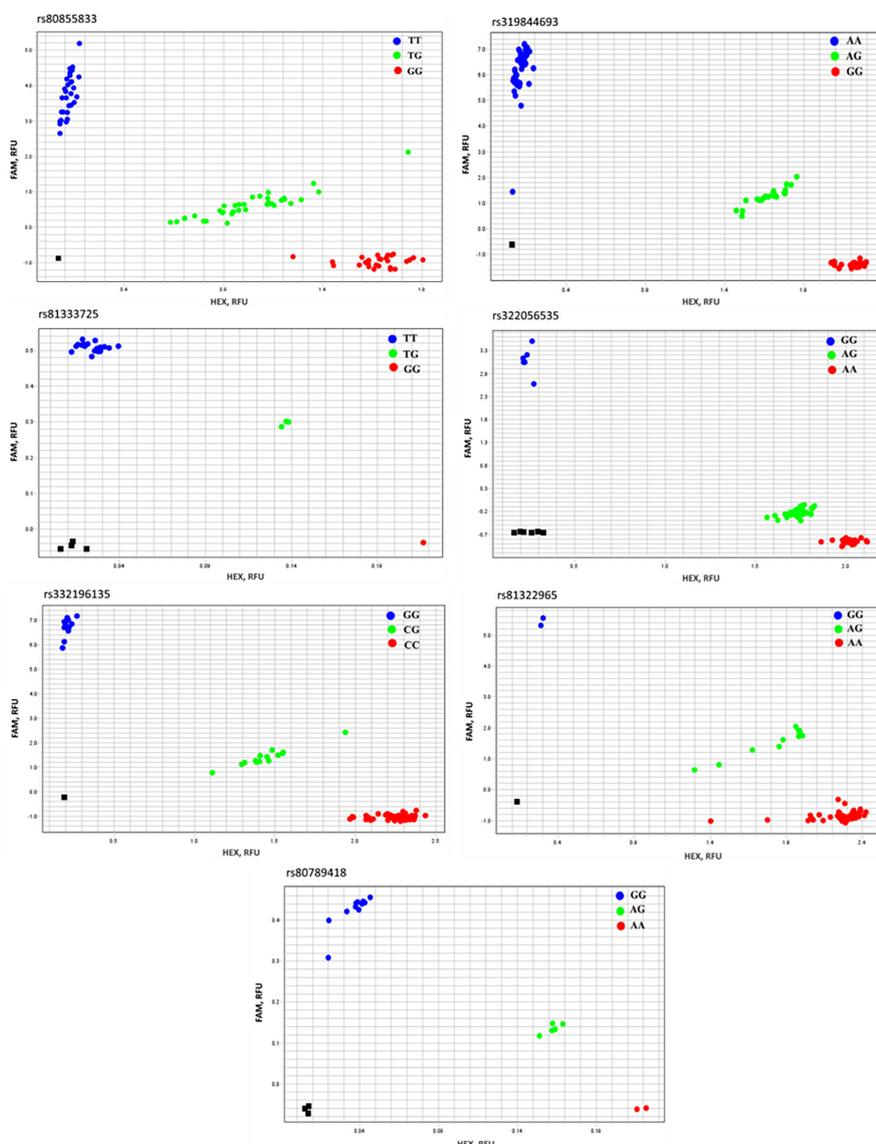


Рис. 1. Аллельная дискриминация для SNP, вошедших в тест-системы для дифференциации пород свиней йоркшир, БКБ и БМ

Fig. 1. Allelic discrimination for SNPs included in test systems for differentiating Yorkshire, BLW and BM pig breeds

Определение генома in silico. Генотипы *in silico* для животных, геномы которых были представлены в открытом доступе в NCBI, определяли с использованием оригинального программного обеспечения GENIS [19]. В биоинформатическом анализе были задействованы 248 особей вида *S. scrofa domesticus*, отсеквенированные геномы которых расположены в базе Sequence Read Archive (SRA) [20]: PRJNA322309, PRJNA343658, PRJNA671763, PRJNA712489, PRJEB1683, PRJEB30282, PRJEB9922, PRJNA255085, PRJNA260763, PRJNA506339, PRJNA507853, PRJNA520978, PRJNA550237, PRJNA553106, PRJNA309108, PRJNA485589, PRJNA487172, PRJNA488960, PRJNA622908, PRJNA626370.

Статистический анализ данных. Дифференцирующий потенциал SNP определяли с использованием ROC-анализа (receiver operating characteristic) в SPSS v.20.0. При наличии нижней границы асимптотического 95%-го доверительного интервала (ДИ) более 0,6 для параметра AUC (площадь под кривой) полиморфизм позиционировался как генетический маркер с дифференцирующим потенциалом выше среднего. Оценку дифференцирующего потенциала для совокупности SNP проводили с использованием программы MDR v.3.0.2 [21]. Вклад конкретного генотипа определялся величиной энтропии (H, %). В процессе моделирования были использованы настройки: количество атрибутов – от 1 до n (где n – количество переменных в модели); анализ топ-моделей – 1000; воспроизводимость модели – 100; поиск конфигурации модели – всесторонний; метод сравнения – точный тест Фишера; классификация ячеек – неклассифицированные. Корректность модели оценивали по значению сбалансированной точности. Также вероятность отнесения образца к одной из групп рассчитывали с использованием логистической регрессии.

Результаты и обсуждение. Первый этап исследования заключался в биоинформатическом анализе потенциально информативных SNP [22], а также находящихся рядом SNP из перечня Axiom® Porcine Genotyping Array (Affymetrix©). Дополнительно исследовались SNP, для которых ранее была выявлена связь с локусами количественных признаков (Quantitative Trait Locus, QTL) [23]. Определение генотипа *in silico* для этих SNP было осуществлено с помощью программы GENIS для 248 животных вида *S. scrofa domesticus* [24].

Далее полученные результаты были проанализированы с применением ROC-кривых, определен параметр AUC (area under ROC curve) для каждого SNP. В итоге определены SNP с высоким дифференцирующим потенциалом. Для свиней породы йоркшир по результатам биоинформатического анализа значение асимптотической значимости AUC для SNP находилось в диапазоне $1,45 \cdot 10^{-4}$ – $5,36 \cdot 10^{-4}$ при значениях AUC = 0,747–0,852. Для свиней породы КБ для SNP значение AUC составило 0,694–0,828 ($p = 1,24 \cdot 10^{-5}$ – $2,26 \cdot 10^{-13}$). Для наиболее информативных из них проведены дополнительные молекулярно-генетические исследования с использованием технологии KASP.

Первоначально для пород йоркшир и КБ оценка совместного взаимодействия SNP проводилась в программе MDR v.3.0.2 с использованием результатов генотипирования *in silico*. В итоге был сформирован перечень из 10 SNP с наибольшим дифференцирующим потенциалом для анализируемых пород свиней (дюрок, ландрас, йоркшир, КБ, пьетрен). В дальнейшем для этих SNP определены генотипы 328 образцов, представленных породами дюрок, ландрас, йоркшир, БКБ и БМ. Повторный анализ с использованием метода многофакторного сокращения размерности позволил актуализировать величину энтропии H применительно к породам из Беларуси (рис. 2).

Для свиней породы йоркшир синергичный эффект средней выраженности показан для пары SNP rs80855833/rs81322965, для свиней породы БКБ – rs80789418/rs80967182, для свиней породы БМ – rs332196135/rs319844693 и rs80967182/rs81333725 (выраженный синергичный эффект), rs80855833/rs81322965 (синергичный эффект средней выраженности). Таким образом, для этих пар SNP совместный вклад в дифференциацию породы свиней превышает сумму значений H по отдельности. Наибольшим дифференцирующим потенциалом для свиней породы йоркшир обладают SNP rs319844693 (AUC = 0,895, 95%-й ДИ = [0,855–0,935], $p = 1,03 \cdot 10^{-25}$), rs81333725 (AUC = 0,741, 95%-й ДИ = [0,685–0,797], $p = 1,44 \cdot 10^{-10}$) и rs80855833 (AUC = 0,714, 95%-й ДИ = [0,652–0,776], $p = 1,31 \cdot 10^{-8}$). Также наибольший дифференцирующий потенциал для свиней породы БКБ был определен для SNP rs332196135 (AUC = 0,786, 95%-й ДИ = [0,714–0,858], $p = 1,66 \cdot 10^{-10}$), rs322056535 (AUC = 0,738, 95%-й ДИ = [0,674–0,801], $p = 1,12 \cdot 10^{-7}$), rs81322965

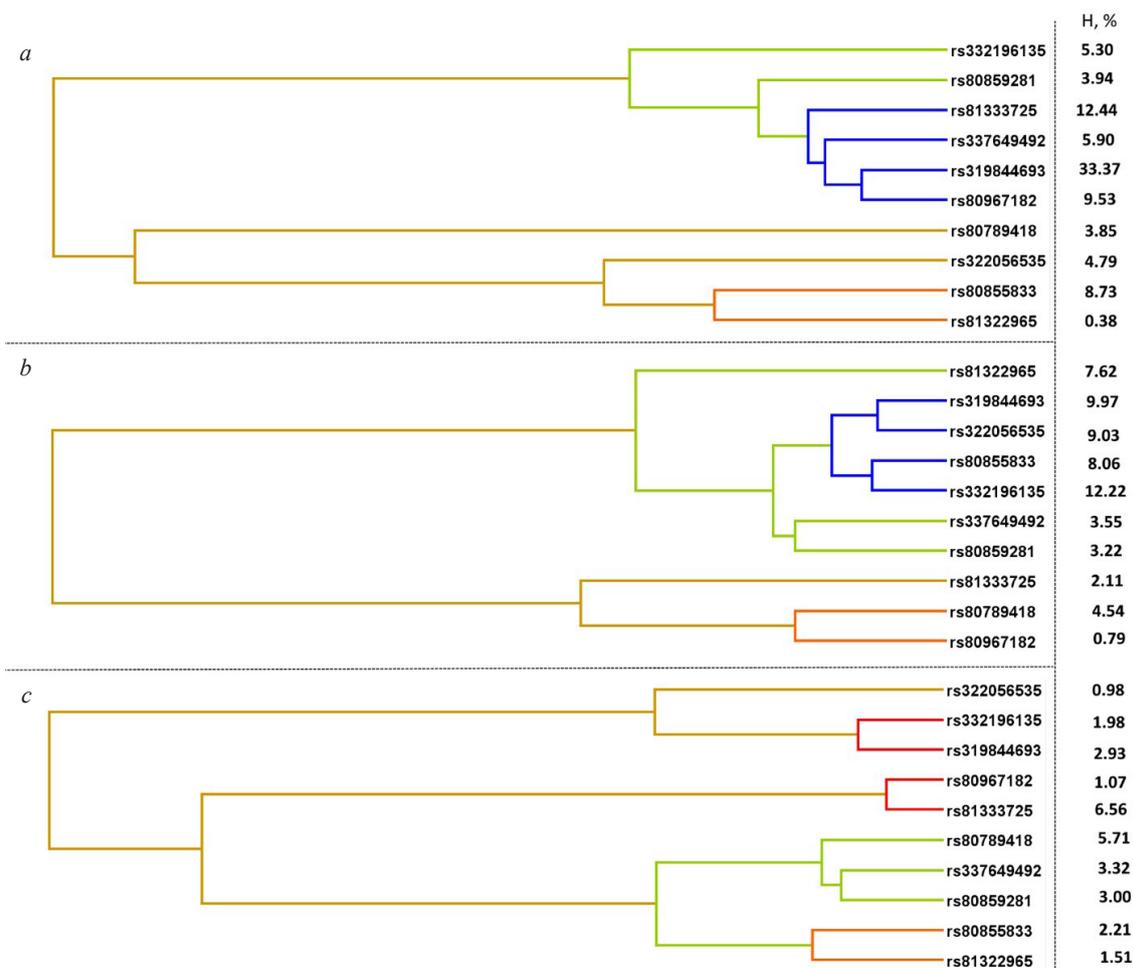


Рис. 2. Совокупный вклад нескольких SNP для дифференциации пород свиней йоркшир (a), БКБ (b) и БМ (c); рядом с номером SNP приведено значение энтропии H (красная линия – сильный синергичный эффект, оранжевая – слабый синергичный эффект, коричневая – эффект отсутствует, зеленая – слабый аддитивный эффект, синяя – сильный аддитивный эффект)

Fig. 2. Cumulative contribution of several SNPs for differentiation of Yorkshire (a), BLW (b) and BM (c) pig breeds; Next to the SNP number is the entropy value H (red line – strong synergistic effect, orange – weak synergistic effect, brown – no effect, green – weak additive effect, blue – strong additive effect)

(AUC = 0,737, 95%-й ДИ = [0,661–0,813], $p = 1,24 \cdot 10^{-7}$). Для свиней породы БМ наибольший дифференцирующий потенциал был выявлен для SNP rs80789418 (AUC = 0,707, 95%-й ДИ = [0,635–0,780], $p = 6,44 \cdot 10^{-6}$), rs81333725 (AUC = 0,693, 95%-й ДИ = [0,621–0,764], $p = 2,76 \cdot 10^{-5}$), rs319844693 (AUC = 0,633, 95%-й ДИ = [0,556–0,710], $p = 3,80 \cdot 10^{-3}$).

В выборке свиней породы йоркшир частота распространенности аллеля G для rs319844693 составила 79,2 %, для остальных пород она варьировалась в диапазоне 0,0–53,1 %; частота распространенности аллеля G для rs81333725 составила 10,4 %, для остальных пород – 21,8–97,8 %. Для rs80855833 в выборке свиней породы йоркшир аллель T встречается с частотой 80,5 %, в то время как в выборках пород ландрас и БМ – 14,5 и 54,3 % соответственно. В выборке породы БКБ распространенность аллеля G для rs332196135 составила 56,1 %, для остальных пород она варьировалась в диапазоне 0,0–39,0 %; частота распространенности аллеля G для rs322056535 составила 10,4 %, для остальных пород – 19,5–58,7 %. Для rs81322965 в выборке БКБ аллель G встречается с частотой 59,2 %, в то время как в выборках пород дюрок, ландрас, йоркшир и БМ – 41,3, 17,7, 26,0 и 28,3 % соответственно. В выборке БМ аллель A для rs80789418 был распространен с частотой 75,0 %, для выборок пород дюрок, йоркшир и БКБ – 12,0, 33,8 и 25,5 % соответственно; частота распространенности аллеля G для rs81333725 составила 63,0 %, для выборок пород

ландрас и йоркшир – 21,8 и 10,4 % соответственно. Для rs319844693 в выборке БМ аллель G встречается с частотой 13,0 %, в то время как в выборках пород йоркшир и БКБ – 79,2 и 53,1 % соответственно.

Точность дифференциации (Balanced accuracy) свиней породы йоркшир от других пород (дюрок, ландрас, БКБ и БМ) при анализе SNP rs80855833, rs81333725 и rs319844693 составила 93,65 % (специфичность модели, т. е. отношение числа истинно-отрицательных классификаций к общему числу отрицательных наблюдений, – 88,83 %, чувствительность, т. е. отношение числа истинно-положительных классификаций к общему числу положительных наблюдений, – 98,46 %); точность дифференциации свиней породы БКБ от других пород (дюрок, ландрас, йоркшир и БМ) при анализе SNP rs81322965, rs322056535 и rs332196135 составила 92,39 % (специфичность модели – 92,19 %, чувствительность – 92,59 %); точность дифференциации свиней породы БМ от других пород (дюрок, ландрас, йоркшир и БКБ) при анализе SNP rs80789418, rs81333725 и rs319844693 составила 82,46 % (специфичность модели – 87,50 %, чувствительность – 77,42 %). Графическая интерпретация моделей представлена на рис. 3.

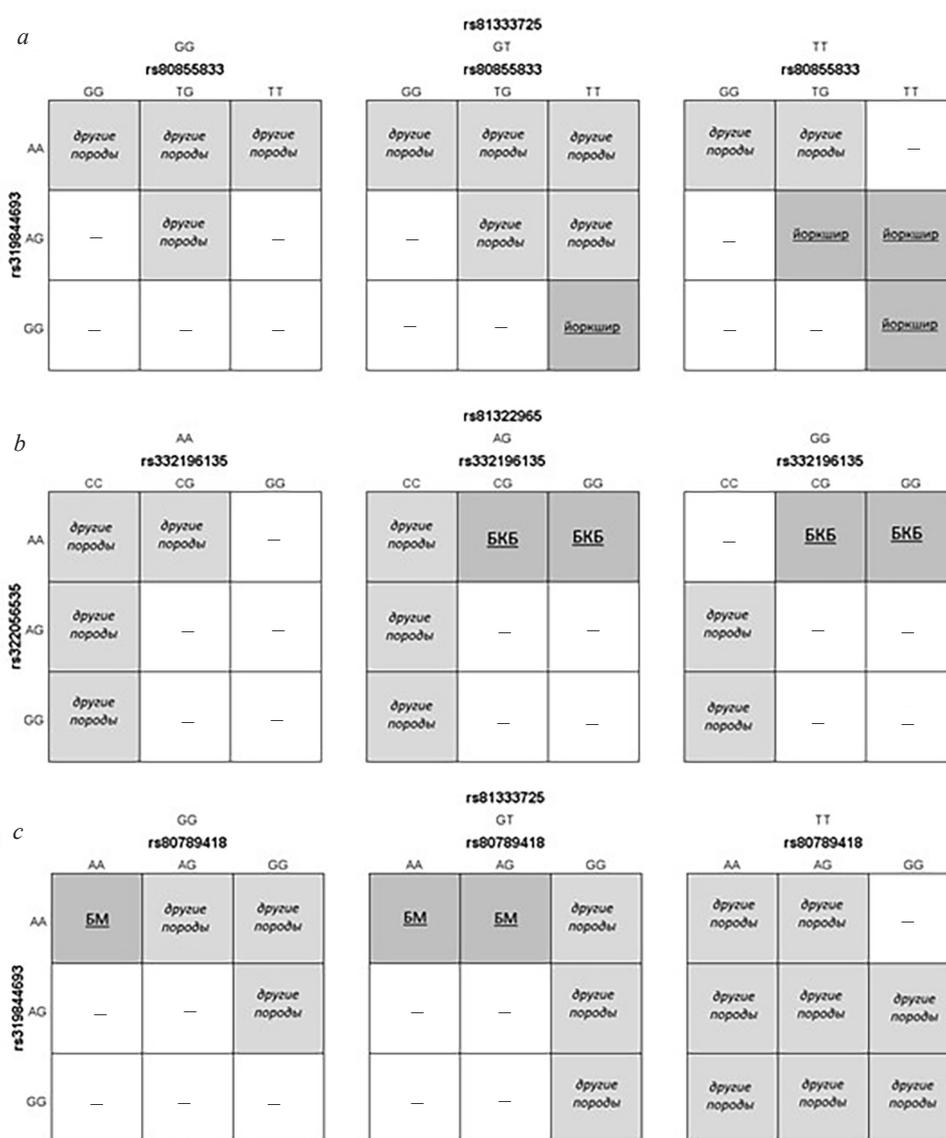


Рис. 3. Графическое представление моделей для дифференциации пород свиней (адаптировано из программы MDR v.3.0.2): а – йоркшир, б – БКБ, с – БМ

Fig. 3. Graphic representation of models for differentiation of pig breeds (adapted from the MDR v.3.0.2 program): a – Yorkshire, b – BKB, c – BM

Для свиней породы йоркшир наибольшие значения энтропии выявлены для rs319844693 (33,37 %), rs81333725 (12,44 %) и rs80855833 (8,73 %). При оценке точности отнесения образца к одной из двух групп («Йоркшир» или «Другие породы») с использованием логистической регрессии получены следующие результаты:

при наличии генотипов TT (rs81333725)/TT (rs80855833)/AG или GG (rs319844693) вероятность отнесения образца к группе «Йоркшир» составляет 82,03–86,88 % (в совокупности распространенность особей с данными генотипами в группе «Йоркшир» – 58,44 %);

при наличии генотипов GG (rs81333725)/TT, или TG, или GG (rs80855833)/AA (rs319844693) вероятность отнесения образца к группе «Другие породы» составляет 96,21–99,62 % (в совокупности встречаемость особей с данными генотипами в группе «Другие породы» – 30,28 %); при наличии генотипов GT (rs81333725)/TT, или TG, или GG (rs80855833)/AA или AG (rs319844693) – 86,33–98,50 % (распространенность особей – 26,69 %); при наличии генотипов TT (rs81333725)/GG или TG (rs80855833)/AA (rs319844693) – 91,86–94,24 % (распространенность особей – 27,09 %);

в 7,32 % случаев особей не удалось отнести ни к одному кластеру с заявленным в программе MDR v.3.0.2 уровнем точности в 95,0 %.

Для свиней породы БКБ наибольшие значения энтропии определены для rs332196135 (12,22 %), rs322056535 (9,03 %) и rs81322965 (7,62 %). При оценке точности отнесения образца к одной из двух групп («БКБ» или «Другие породы») с использованием логистической регрессии получены следующие данные:

при наличии генотипов AG или GG (rs81322965)/GG или CG (rs332196135)/AA (rs322056535) вероятность отнесения образца к группе «БКБ» составляет 66,21–87,39 % (в совокупности встречаемость особей с данными генотипами в группе «Другие породы» – 51,02 %);

при наличии генотипа AA (rs81322965)/CC или CG (rs332196135)/AA, или AG, или GG (rs322056535) вероятность отнесения образца к группе «Другие породы» составляет 86,16–99,74 % (в совокупности распространенность особей с данными генотипами в группе «Другие породы» – 51,24 %); при наличии генотипов AG (rs81322965)/CC (rs332196135)/AA, или AG, или GG (rs322056535) – 85,87–99,08 % (распространенность особей – 25,09 %); при наличии генотипов GG (rs81322965)/CC (rs332196135)/AG или GG (rs322056535) – 87,84–96,81 % (встречаемость особей – 9,32 %);

в 15,55 % случаев особей не удалось отнести ни к одному кластеру с заявленным в программе MDR v.3.0.2 уровнем точности в 95,0 %.

Для свиней породы БМ наибольшие значения энтропии рассчитаны для rs81333725 (6,56 %), rs80789418 (5,71 %) и rs319844693 (2,93 %). При оценке точности отнесения образца к одной из двух групп («БМ» или «Другие породы») с использованием логистической регрессии получены следующие значения:

при наличии генотипов GG (rs81333725)/AA (rs80789418)/AA (rs319844693) вероятность отнесения образца к группе «БМ» составляет 79,81 % (в совокупности распространенность особей с данными генотипами в группе «БМ» – 17,39 %); при наличии генотипов GT (rs81333725)/AA или AG (rs80789418)/AA (rs319844693) – 78,23–89,26 % (встречаемость особей – 34,78 %);

при наличии генотипов GG (rs81333725)/GG (rs80789418)/AA или AG (rs319844693) вероятность отнесения образца к группе «Другие породы» составляет 89,00–92,75 % (в совокупности распространенность особей с данными генотипами в группе «Другие породы» – 13,12 %); при наличии генотипов GT (rs81333725)/GG (rs80789418)/AA, или AG, или GG (rs319844693) – 95,75–98,26 % (распространенность особей – 8,15 %); при наличии генотипов TT (rs81333725)/AA, или AG, или GG (rs80789418)/AA, или AG, или GG (rs319844693) – 83,90–99,37 % (встречаемость особей – 53,19 %);

в 11,28 % случаев особей не удалось отнести ни к одному кластеру с заявленным в программе MDR v.3.0.2 уровнем точности в 95,0 %.

В результате моделирования выявлены свиньи с генетическим профилем, не совпадающим с тем, который характерен для них на основании предложенных тест-систем. Например, свиньи с генотипами GT (rs81333725)/TT (rs80855833)/GG (rs319844693) согласно тест-системе, разработанной для йоркшира, отнесены к породе БКБ, а с генотипами TT (rs81333725)/TG или

ТТ (rs80855833)/AG или GG (rs319844693) – к породам БКБ (15 шт.) и ландрас (5 шт.). Аналогичная ситуация наблюдается для свиней с генотипами AG или GG (rs81322965)/CG или GG (rs332196135)/AA (rs322056535), которые, согласно тест-системе для БКБ, должны быть отнесены к данной породе, а по факту являются представителями пород БМ (5 шт.), йоркшир (9 шт.) и ландрас (1 шт.). Соответственно, и свиньи с генотипами GG (81333725)/AA (rs80789418)/AA (rs319844693) отнесены к породе ландрас (5 шт.), а, согласно предложенной тест-системе, должны быть идентифицированы как БМ. Первоначально, на этапе биоинформатического анализа, специфичные SNP отбирались для пород дюрок, ландрас, крупная белая, мейшань, пьетрен и йоркшир, которые были представлены в NCBI-SRA. Такие породы свиней, как БКБ или БМ, отсутствовали на начальном биоинформатическом этапе, а для белорусских пород дюрок, ландрас, йоркшир существуют свои локальные особенности, обусловленные селекционными процессами. Полученные нами результаты подтверждают данные факты и объясняют отсутствие полной конкордантности между результатами биоинформатического и молекулярно-генетического анализа. В этой связи сделанные нами выводы и разработанные тест-системы для свиней пород йоркшир белорусской селекции, БКБ и БМ являются важным заделом для продолжения исследований в этой области, так как позволяют определить регионы в геноме *S. scrofa domesticus*, на которых следует сосредоточить внимание и провести дополнительный этап секвенирования.

Ранее нами были проведены аналогичные исследования для свиней пород дюрок [25–27] и ландрас [28, 29]. Полученные результаты могут использоваться при отборе животных по породной принадлежности для селекции и определения чистопородности в спорных случаях.

Заключение. На основании проведенных биоинформатического и молекулярно-генетического исследований разработаны тест-системы для дифференциации свиней пород йоркшир, БКБ и БМ между собой, а также по отношению к породам ландрас и дюрок, разводимым в Беларуси. По данным молекулярно-генетического анализа сформированы тест-системы, каждая из которых включала три SNP: для йоркшира – rs81333725 (AX-116346555, Chr.8:47482649G>T), rs80855833 (AX-116581153, Chr.17:15827832G>T), rs319844693 (AX-116406049, Chr.10:30081932A>G); для БКБ – rs81322965 (AX-116298633, Chr.6:121005974A>G), rs332196135 (AX-116218162, Chr.3:118879246C>G), rs322056535 (AX-116735790, Chr.7:52269732A>G); для БМ – rs81333725 (AX-116346555, Chr.8:47482649G>T), rs80789418 (AX-116379068, Chr.9:48882095A>G), rs319844693 (AX-116406049, Chr.10:30081932A>G). Сбалансированная точность тест-систем при уровне значимости $p < 0,05$ составляет 82,46–93,65 %.

Результаты исследования отличаются высокой оригинальностью, а также доказывают применимость используемого приема по генотипированию *in silico* для поиска и отбора значимых полиморфизмов для дифференциации пород свиней.

Все применимые международные, национальные и/или институциональные принципы ухода и использования животных были соблюдены.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Молекулярно-генетические исследования выполнены в рамках ГПНИ «Биотехнологии-2», подпрограмма «Геномика, эпигеномика, биоинформатика» на 2021–2025 гг., задание «Разработка системы генетического анализа для определения чистопородности свиней на основе изучения SNP-локусов» (2021–2023 гг., рег. № 20210339).

Программное обеспечение GENIS разработано в рамках НИР «Биоинформатический подход к анализу данных полногеномного секвенирования для поиска однонуклеотидных замен, способных дифференцировать близкородственные биологические виды» (БРФФИ, 2023–2025 гг., B23-060, рег. № 20231076).

Acknowledgements. Molecular genetic studies were carried out within the framework of the State Scientific Research Institute “Biotechnology-2”, subprogram “Genomics, epigenomics, bioinformatics” for 2021–2025, task “Development of a genetic analysis system for determining the purebred of pigs based on the study of SNP loci” (2021–2023, reg. No. 20210339).

The GENIS software was developed as part of the research project “Bioinformatics approach to analyzing whole-genome sequencing data on a search for single-nucleotide substitutions that can differentiate closely related biological species” (BRFFR, 2023–2025, B23-060, reg. No. 20231076).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Dekkers, J. C. M. Marker-assisted selection for commercial crossbred performance / J. C. M. Dekkers // *Journal of Animal Science*. – 2007. – Vol. 85, N 9. – P. 2104–2114. <https://doi.org/10.2527/jas.2006-683>
2. A genome-wide association study for a proxy of intermuscular fat level in the Italian Large White breed identifies genomic regions affecting an important quality parameter for dry-cured hams / L. Fontanesi, G. Schiavo, G. Galimberti [et al.] // *Animal Genetics*. – 2017. – Vol. 48, N 4. – P. 459–465. <https://doi.org/10.1111/age.12542>
3. PorcineSNP60 DNA Analysis Kit v3. – URL: <https://www.illumina.com/products/by-type/microarray-kits/porcine-snp60.html> (date of access: 30.06.2024).
4. Identification of high utility SNPs for population assignment and traceability purposes in the pig using high-throughput sequencing / A. M. Ramos, H. J. Megens, R. P. M. A. Crooijmans [et al.] // *Animal Genetics*. – 2011. – Vol. 42, N 6. – P. 613–620. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2052.2011.02198.x>
5. Genome-wide association study for ham weight loss at first salting in Italian Large White pigs: towards the genetic dissection of a key trait for dry-cured ham production / L. Fontanesi, G. Schiavo, M. Gallo [et al.] // *Animal Genetics*. – 2017. – Vol. 48, N 1. – P. 103–107. <https://doi.org/10.1111/age.12491>
6. Genetic diversity analysis of two commercial breeds of pigs using genomic and pedigree data / R. Zanella, J. O. Peixoto, F. F. Cardoso [et al.] // *Genetics Selection Evolution* – 2016. – Vol. 48. – Art. 24. <https://doi.org/10.1186/s12711-016-0203-3>
7. Genome-wide study on intramuscular fat in Italian Large White pig breed using the PorcineSNP60 BeadChip / R. Davoli, D. Luise, V. Mingazzini, P. [et al.] // *Journal of Animal Breeding and Genetics*. – 2016. – Vol. 133, N 4. – P. 277–282. <https://doi.org/10.1111/jbg.12189>
8. A genome-wide association study in large white and landrace pig populations for number piglets born alive / S. Bergfelder-Drüing, C. Grosse-Brinkhaus, B. Lind [et al.] // *PLoS One*. – 2015. – Vol. 10, N 3. – P. e0117468. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0117468>
9. A genomewide association study for average daily gain in Italian Large White pigs / L. Fontanesi, G. Schiavo, G. Galimberti [et al.] // *Journal of Animal Science* – 2014. – Vol. 92, N 4. – P. 1385–1394. <https://doi.org/10.2527/jas.2013-7059>
10. A genome-wide association study to detect QTL for commercially important traits in Swiss Large White boars / D. Becker, K. Wimmers, H. Luther [et al.] // *PLoS One*. – 2013. – Vol. 8, N 2. – P. e55951. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0055951>
11. Development of a genetic tool for product regulation in the diverse British pig breed market / S. Wilkinson, A. L. Archibald, C. S. Haley [et al.] // *BMC Genomics*. – 2012. – Vol. 13. – Art. 580. <https://doi.org/10.1186/1471-2164-13-580>
12. Using SNP array data to test for host genetic and breed effects on Porcine Reproductive and Respiratory Syndrome Viremia / S. Biffani, S. Botti, S. C. Bishop [et al.] // *BMC Proceedings*. – 2011. – Vol. 5, Suppl 4. – Art. S28. <https://doi.org/10.1186/1753-6561-5-s4-s28>
13. Estimation of U.S. Yorkshire breed composition using genomic data / Y. Huang, R. O. Bates, C. W. Ernst [et al.] // *Journal of Animal Science*. – 2014. – Vol. 92, N 4. – P. 1395–1404. <https://doi.org/10.2527/jas.2013-6907>
14. Uimari, P. Whole-genome SNP association analysis of reproduction traits in the Finnish Landrace pig breed / P. Uimari, A. Sironen, M. L. Sevón-Aimonen // *Genetics Selection Evolution*. – 2011. – Vol. 43, N 1. – Art. 42. <https://doi.org/10.1186/1297-9686-43-42>
15. Multi-breed genome-wide association study reveals novel loci associated with the weight of internal organs / Y. He, X. Li, F. Zhang [et al.] // *Genetics Selection Evolution*. – 2015. – Vol. 47. – Art. 87. <https://doi.org/10.1186/s12711-015-0168-7>
16. Investigations on the pattern of linkage disequilibrium and selection signatures in the genomes of German Piétrain pigs / P. Stratz, K. Wimmers, T. H. E. Meuwissen, J. Bennewitz // *Journal of Animal Breeding and Genetics*. – 2014. – Vol. 131, N 6. – P. 473–482. <https://doi.org/10.1111/jbg.12107>
17. Roberts, K. S. Relationships among and variation within rare breeds of swine / K. S. Roberts, W. R. Lamberson // *Journal of Animal Science*. – 2015. – Vol. 93, N 8. – P. 3810–3813. <https://doi.org/10.2527/jas.2015-9001>
18. Оценка интрогрессии генов свиньи домашней (*Sus scrofa domestica*) в генофонд дикого кабана (*Sus scrofa scrofa*) на основе исследования полиморфизма генов MC1R и NR6A1 / В. Н. Кипень, А. О. Рябцева, С. А. Котова [и др.] // *Молекулярная и прикладная генетика*. – 2019. – Т. 26. – С. 83–95.
19. Кипень, В. Н. GENIS – методологический подход для генотипирования *in silico* (апробация на результатах секвенирования для *Sus scrofa*) / В. Н. Кипень, Е. В. Снытков // *Математическая биология и биоинформатика*. – 2024. – Т. 19, № 1. – С. 36–51.
20. Sequence Read Archive (SRA). – URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/sra> (date of access: 20.06.2024).
21. Multifactor–dimensionality reduction reveals high–order interactions among estrogen–metabolism genes in sporadic breast cancer / M. D. Ritchie, L. W. Hahn, N. Roodi [et al.] // *The American Journal of Human Genetics*. – 2001. – Vol. 69, N 1. – P. 138–147. <https://doi.org/10.1086/321276>
22. Analysis of HEPH Gene Polymorphism on the X Chromosome for Identification of Wild Boar and Domestic Pig / V. N. Kipen, E. V. Ivanova, E. V. Snytkov, A. N. Verchuk // *Russian Journal of Genetics*. – 2020. – Vol. 56, N 9. – P. 1099–1108. <https://doi.org/10.1134/s1022795420080062>
23. Building Applied Genomic Capacity for Animal Industries. – URL: <https://www.animalgenome.org> (date of access: 20.06.2024).
24. Дифференциация пород домашних свиней с использованием расширенного биоинформатического анализа SNP / В. Н. Кипень, Е. В. Снытков, М. Е. Михайлова, Р. И. Шейко // *Доклады Национальной академии наук Беларуси*. – 2022. – Т. 66. – № 3. – С. 301–309.
25. Дифференциация пород свиней с использованием технологии KASP – тест-система для породы дюрюк / В. Н. Кипень, Е. В. Снытков, М. Е. Михайлова, Р. И. Шейко // *Молекулярная и прикладная генетика*. – 2024. – Т. 36. – С. 114–122.

26. Анализ полиморфизма генов KDM3A и DBX2 для дифференциации свиней породы дюрок вида *Sus scrofa domestica* / В. Н. Кипень, М. Е. Михайлова, Е. В. Снытков, Р. И. Шейко // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2023. – Т. 67, № 2. – С. 119–125.

27. Кипень, В. Н. Моделирование панели породоспецифичных SNP-маркеров для определения чистопородности домашних свиней породы дюрок / В. Н. Кипень // Биотехнология: достижения и перспективы развития: сб. материалов II междунар. науч.-практ. конф., Пинск, 7–8 дек. 2017 г. / Полес. гос. ун-т. – Пинск, 2017. – С. 63–65.

28. Котова, С. А. Моделирование панели породоспецифичных SNP-маркеров для генотипирования домашних свиней породы ландрас с использованием MDR-анализа / С. А. Котова, В. Н. Кипень // Современные достижения и проблемы биотехнологии сельскохозяйственных животных БиоТехЖ – 2016: материалы 11-й Всерос. конф.-шк. ученых с междунар. участием, п. Дубровицы, 13–16 дек. 2016 г. / Всерос. науч.-исслед. ин-т животноводства им. акад. Л. К. Эрнста. – п. Дубровицы, 2016. – С. 86–91.

29. Биоинформатический анализ геномов домашних свиней – породоспецифичные SNP для пород ландрас и пьетрен / Е. В. Снытков, В. Н. Кипень, М. Е. Михайлова [и др.] // Генетические проблемы в популяциях: материалы Науч. конф. с междунар. участием, посвящ. 50-летию юбилею лаборатории популяц. генетики им. Ю. П. Алтухова ИОГен РАН и 85-летию со дня рождения акад. Юрия Петровича Алтухова, Москва, 11–14 нояб. 2022 г. / Ин-т общей генетики им. Н. И. Вавилова РАН; ред.: Д. В. Политов [и др.]. – М., 2022. – С. 56.

References

1. Dekkers J. C. M. Marker-assisted selection for commercial crossbred performance. *Journal of Animal Science*, 2007, vol. 85, no. 9, pp. 2104–2114. <https://doi.org/10.2527/jas.2006-683>
2. Fontanesi L., Schiavo G., Galimberti G., Bovo S., Russo V., Gallo M., Buttazzoni L. A genome-wide association study for a proxy of intermuscular fat level in the Italian Large White breed identifies genomic regions affecting an important quality parameter for dry-cured hams. *Animal genetics*, 2017, vol. 48, no. 4, pp. 459–465. <https://doi.org/10.1111/age.12542>
3. *PorcineSNP60 DNA Analysis Kit v3*. Available at: <https://www.illumina.com/products/by-type/microarray-kits/porcine-snp60.html> (accessed 30.06.2024).
4. Ramos A. M., Megens H. J., Crooijmans R. P. M. A., Schook L. B., Groenen M. A. M. Identification of high utility SNPs for population assignment and traceability purposes in the pig using high-throughput sequencing. *Animal genetics*, 2011, vol. 42, no. 6, pp. 613–620. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2052.2011.02198.x>
5. Fontanesi L., Schiavo G., Gallo M., Baiocco C., Galimberti G., Bovo S., Russo V., Buttazzoni L. Genome-wide association study for ham weight loss at first salting in Italian Large White pigs: towards the genetic dissection of a key trait for dry-cured ham production. *Animal Genetics*, 2017, vol. 48, no. 1, pp. 103–107. <https://doi.org/10.1111/age.12491>
6. Zanella R., Peixoto J. O., Cardoso F. F., Cardoso L. L., Biegelmeyer P., Cantão M. E., Otaviano A., Freitas M. S., Caetano A. R., Ledur M. C. Genetic diversity analysis of two commercial breeds of pigs using genomic and pedigree data. *Genetics Selection Evolution*, 2016, vol. 48, art. 24. <https://doi.org/10.1186/s12711-016-0203-3>
7. Davoli R., Luise D., Mingazzini V., Zambonelli P., Braglia S., Serra A., Russo V. Genome-wide study on intramuscular fat in Italian Large White pig breed using the PorcineSNP60 BeadChip. *Journal of Animal Breeding and Genetics*, 2016, vol. 133, no. 4, pp. 277–282. <https://doi.org/10.1111/jbg.12189>
8. Bergfelder-Drüing S., Grosse-Brinkhaus C., Lind B., Erbe M., Schellander K., Simianer H., Tholen E. A genome-wide association study in large white and landrace pig populations for number piglets born alive. *PLoS One*, 2015, vol. 10, no. 3, p. e0117468. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0117468>
9. Fontanesi L., Schiavo G., Galimberti G., Calò D. G., Russo V. A genomewide association study for average daily gain in Italian Large White pigs. *Journal of Animal Science*, 2014, vol. 92, no. 4, pp. 1385–1394. <https://doi.org/10.2527/jas.2013-7059>
10. Becker D., Wimmers K., Luther H., Hofer A., Leeb T. A genome-wide association study to detect QTL for commercially important traits in Swiss Large White boars. *PLoS One*, 2013, vol. 8, no. 2, p. e55951. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0055951>
11. Wilkinson S., Archibald A. L., Haley C. S., Megens H.-J., Crooijmans R., Groenen M., Wiener P., Ogden R. Development of a genetic tool for product regulation in the diverse British pig breed market. *BMC Genomics*, 2012, vol. 13, art. 580. <https://doi.org/10.1186/1471-2164-13-580>
12. Biffani S., Botti S., Bishop S. C., Stella A., Giuffra E. Using SNP array data to test for host genetic and breed effects on Porcine Reproductive and Respiratory Syndrome Viremia. *BMC Proceedings*, 2011, vol. 5, suppl. 4, art. S28. <https://doi.org/10.1186/1753-6561-5-s4-s28>
13. Huang Y., Bates R. O., Ernst C. W., Fix J. S., Steibel J. P. Estimation of U.S. Yorkshire breed composition using genomic data. *Journal of Animal Science*, 2014, vol. 92, no. 4, pp. 1395–1404. <https://doi.org/10.2527/jas.2013-6907>
14. Uimari P., Sironen A., Sevón-Aimonen M. L. Whole-genome SNP association analysis of reproduction traits in the Finnish Landrace pig breed. *Genetics Selection Evolution*, 2011, vol. 43, no. 1, art. 42. <https://doi.org/10.1186/1297-9686-43-42>
15. He Y., Li X., Zhang F., Su Y., Hou L., Chen H., Zhang Z., Huang L. Multi-breed genome-wide association study reveals novel loci associated with the weight of internal organs. *Genetics Selection Evolution*, 2015, vol. 47, art. 87. <https://doi.org/10.1186/s12711-015-0168-7>
16. Stratz P., Wimmers K., Meuwissen T. H. E., Bennewitz J. Investigations on the pattern of linkage disequilibrium and selection signatures in the genomes of German Pietrain pigs. *Journal of Animal Breeding and Genetics*, 2014, vol. 131, no. 6, pp. 473–482. <https://doi.org/10.1111/jbg.12107>
17. Roberts K. S., Lamberson W. R. Relationships among and variation within rare breeds of swine. *Journal of Animal Science*, 2015, vol. 93, no. 8, pp. 3810–3813. <https://doi.org/10.2527/jas.2015-9001>

18. Kipen' V. N., Ryabtseva A. O., Kotova S. A., Zhurina N. V., Gandzha A. I., Tsybovskii I. S. Polymorphism analysis of MC1R and NR6A1 genes to evaluate the level of introgression of domestic swine (*Sus scrofa domestica*) genes in wild boar (*Sus scrofa scrofa*) population. *Molekulyarnaya i prikladnaya genetika* [Molecular and applied genetics], 2019, vol. 26, pp. 83–95 (in Russian).
19. Kipen' V. N., Snytkov E. V. GENIS – methodological approach for *in silico* genotyping (validation on *Sus scrofa* sequencing results). *Matematicheskaya biologiya i bioinformatika = Mathematical Biology and Bioinformatics*, 2024, vol. 19, no. 1, pp. 36–51 (in Russian).
20. *Sequence Read Archive (SRA)*. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/sra> (accessed 20.06.2024).
21. Ritchie M. D., Hahn L. W., Roodi N., Bailey L. R., Dupont W. D., Parl F. F., Moore J. H. Multifactor–dimensionality reduction reveals high–order interactions among estrogen–metabolism genes in sporadic breast cancer. *American Journal of Human Genetics*, 2001, vol. 69, no. 1, pp. 138–147. <https://doi.org/10.1086/321276>
22. Kipen' V. N., Ivanova E. I., Snytkov E. V., Verchuk A. N. Analysis of HEPH Gene Polymorphism on the X Chromosome for Identification of Wild Boar and Domestic Pig. *Russian Journal of Genetics*, 2020, vol. 56, no. 9, pp. 1099–1108. <https://doi.org/10.1134/s1022795420080062>
23. *Building Applied Genomic Capacity for Animal Industries*. Available at: <https://www.animalgenome.org> (accessed 20.06.2024).
24. Kipen' V. N., Snytkov E. V., Mikhailova M. E., Sheiko R. I. Breed differentiation of domestic pigs using SNP – extended bioinformatical analysis. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Reports of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2022, vol. 66, no. 3, pp. 301–309 (in Russian).
25. Kipen' V. N., Snytkov E. V., Mikhailova M. E., Sheiko R. I. Differentiation of pig breeds using KASP technology – test-system for duroc. *Molekulyarnaya i prikladnaya genetika* [Molecular and applied genetics], 2024, vol. 36, pp. 114–122 (in Russian).
26. Kipen' V. N., Mikhailova M. E., Snytkov E. V., Sheiko R. I. Analysis of KDM3A and DBX2 gene polymorphism for differentiation of *Sus scrofa domestica* duroc pigs. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Reports of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2023, vol. 67, no. 2, pp. 119–125 (in Russian).
27. Kipen' V. N. Modelirovanie paneli porodospetsifichnyh SNP-markerov dlya opredeleniya chistoporodnosti domashnih svinej porody dyuroc. *Biotekhnologiya: dostizheniya i perspektivy razvitiya: sbornik materialov II mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Pinsk, 7–8 dekabrya 2017 goda* [Biotechnology: achievements and development prospects: collection of materials of the II international scientific and practical conference, Pinsk, December 7–8, 2017]. Pinsk, 2017, pp. 63–65 (in Russian).
28. Kotova S. A., Kipen' V. N. Modelirovanie paneli porodospetsifichnyh SNP-markerov dlya genotipirovaniya domashnih svinej porody landras s ispol'zovaniem MDR-analiza. *Sovremennye dostizheniya i problemy biotekhnologii sel'skokhozyaistvennykh zhivotnykh BioTehZh – 2016: materialy 11-i Vserossiiskoi konferentsii-shkoly uchenykh s mezhdunarodnym uchastiem, poselok Dubrovitsy, 13–16 dekabrya 2016 goda* [Modern achievements and problems of biotechnology of agricultural animals BioTechZh – 2016: materials of the 11th All-Russian conference-school of scientists with international participation, Dubrovitsy settlement, December 13–16, 2016]. Dubrovitsy, 2016, pp. 86–91 (in Russian).
29. Snytkov E. V., Kipen' V. N., Mikhailova M. E., Belyak O. A., Romanishko E. L., Sheiko R. I. Bioinformaticheskij analiz genomov domashnih svinej – porodospetsifichnye SNP dlya porod landras i p'etren. *Geneticheskie problemy v populyatsiyakh: materialy Nauchnoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoi 50-letnemu yubileyu laboratorii populyatsionnoi genetiki imeni Yu. P. Altukhova IOGen RAN i 85-letiyu so dnya rozhdeniya akademika Yuriya Petrovicha Altukhova, 11–14 noyabrya 2022 goda* [Genetic Problems in Populations: Proceedings of the Scientific Conference with International Participation Dedicated to the 50th Anniversary of the Yu. P. Altukhov Laboratory of Population Genetics, Institute of Genetics of the Russian Academy of Sciences and the 85th Anniversary of the Birth of Academician Yuri Petrovich Altukhov, November 11–14, 2022]. Moscow, 2022, p. 56 (in Russian).

Информация об авторах

Кипень Вячеслав Николаевич – канд. биол. наук, доцент, вед. науч. сотрудник. Институт генетики и цитологии НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: v.kipen@igc.by

Снытков Евгений Владимирович – науч. сотрудник. Институт генетики и цитологии НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: evsnytkov@gmail.com

Михайлова Мария Егоровна – канд. биол. наук, доцент, заведующий лабораторией. Институт генетики и цитологии НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: M.Mikhailova@igc.by

Information about the authors

Vyacheslav N. Kipen' – Ph. D. (Biol.), Associate Professor, Leading Researcher. Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: v.kipen@igc.by

Evgenij V. Snytkov – Researcher. Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: evsnytkov@gmail.com

Mariya E. Mikhailova – Ph. D. (Biol.), Associate Professor, Head of Laboratory. Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: M.Mikhailova@igc.by

ISSN 1029-8940 (Print)

ISSN 2524-230X (Online)

УДК 574.2:502.22-022.233

<https://doi.org/10.29235/1029-8940-2025-70-1-80-88>

Поступила в редакцию 10.12.2024

Received 10.12.2024

А. И. Чайковский¹, М. В. Кудин², Д. Г. Груммо³, М. В. Максименков¹, В. В. Устин¹

¹Научно-практический центр НАН Беларуси по биоресурсам, Минск, Республика Беларусь

²Полесский государственный радиационно-экологический заповедник, Хойники, Республика Беларусь

³Институт экспериментальной ботаники имени В. Ф. Купревича НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

К ВОПРОСУ О ПРИДАНИИ ПРИРОДООХРАННОГО СТАТУСА ПОЛЕССКОМУ ГОСУДАРСТВЕННОМУ РАДИАЦИОННО-ЭКОЛОГИЧЕСКОМУ ЗАПОВЕДНИКУ

Аннотация. Полесский государственный радиационно-экологический заповедник (ПГРЭЗ) функционирует с 1988 г. в пределах зоны эвакуации (отчуждения) после аварии на Чернобыльской АЭС. Специфика состава выпавший радионуклидов, присутствие в экосистемах топливных частиц и высокая плотность радиоактивного загрязнения почвы определили «заповедность» ПГРЭЗ и долгосрочные стратегические аспекты его развития. Ключевые цели создания ПГРЭЗ – осуществление комплекса мероприятий по предотвращению выноса радионуклидов за пределы его территории, изучение состояния природных растительных комплексов, животного мира, ведение радиационно-экологического мониторинга, проведение радиобиологических и радиоэкологических исследований. В тоже время, обладая высоким природоохранным потенциалом, ПГРЭЗ не является особо охраняемой природной территорией (ООПТ).

В статье приведены результаты анализа соответствия территории ПГРЭЗ общим и специальным критериям выбора природных территорий для объявления их ООПТ, установленным ст. 16 Закона Республики Беларусь от 15.11.2018 № 150-З «Об особо охраняемых природных территориях». Анализ показал, что имеются веские основания для того, чтобы присвоить ПГРЭЗ статус ООПТ с категорией заповедника: территория отвечает 5 общим (2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.7) и 3 специальным критериям, в соответствии с которыми природные территории относятся к заповедникам.

Ключевые слова: Полесский государственный радиационно-экологический заповедник, особо охраняемые природные территории, биологическое и ландшафтное разнообразие, зона эвакуации (отчуждения), радиоактивное загрязнение, критерии выбора природных территорий для объявления их ООПТ

Для цитирования: К вопросу о придании природоохранного статуса полесскому государственному радиационно-экологическому заповеднику / А. И. Чайковский, М. В. Кудин, Д. Г. Груммо [и др.] // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Сэрыя біялагічных навук. – 2025. – Т. 70, № 1. – С. 80–88. <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2025-70-1-80-88>

Alexander I. Tchaikovsky¹, Maksim V. Kudin², Dmitry G. Grummo³, Michail V. Maksimenkov¹, Vladimir V. Ustin¹

¹Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus on Bioresources, Minsk, Republic of Belarus

²Polesie State Radiation and Ecological Reserve, Khoyniki, Republic of Belarus

³V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

ON THE GRANTING NATURE PROTECTION STATUS TO THE POLESIE STATE RADIATION AND ECOLOGICAL RESERVE

Abstract. The Polesie State Radiation and Ecological Reserve (PSRER) has been operating since 1988 within the Belarusian sector of the evacuation (exclusion) zone after the Chernobyl accident. The specific composition of radionuclide fallout, the presence of fuel particles in ecosystems and the high density of radioactive contamination of the soil determined the “reserve” status of PSRER and long-term strategic aspects of its development. The key objectives of creating PSRER are to implement a set of measures to prevent the removal of radionuclides beyond its territory, the study of the state of natural plant complexes, wildlife, radiation and environmental monitoring, and radio-biological and radio-ecological research. At the same time, despite its high conservation potential, PSRER is not a specially natural protected area (SNPA). The article presents the results of analysis of the compliance of the PSRER territory with the general and special criteria for selecting natural territories for SNPA granting, established by Article 16 of the Law of the Republic of Belarus “On Specially Natural Protected Areas”. There are compelling reasons for giving this natural territory the status of SNPA with the category of a reserve: the territory meets 5 general criteria (criteria 2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.7) and all 3 special criteria presented for declaring natural territories a reserve.

Keywords: Polesie State Radiation and Ecological Reserve, specially natural protected areas, biological and landscape diversity, reserve, evacuation (exclusion) zone, radioactive contamination, criteria for selecting natural areas for declaring them as specially protected natural areas

For citation: Tchaikovsky A. I., Kudin M. V., Grummo D. G., Maksimenkov M. V., Ustin V. V. On the granting nature protection status to the Polesie State Radiation and Ecological Reserve. *Vesti Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya biyalagichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological series*, 2025, vol. 70, no. 1, pp. 80–88 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2025-70-1-80-88>

Введение. Одним из основных путей сохранения естественных экологических систем, биологического и ландшафтного разнообразия, устойчивого использования объектов животного и растительного мира в Республике Беларусь является обеспечение функционирования и совершенствования системы особо охраняемых природных территорий (ООПТ). Приоритеты и направления в ее развитии определяются Национальной стратегией развития системы ООПТ, а пространственно-территориальное формирование осуществляется на основе схем рационального размещения ООПТ республиканского и местного значений (Закон Республики Беларусь от 15.11.2018 № 150-3 «Об особо охраняемых природных территориях»; Закон № 150-3). В научной и природоохранной среде регулярно обсуждается вопрос о возможности и необходимости придания Полесскому государственному радиационно-экологическому заповеднику (ПГРЭЗ) статуса ООПТ как территории, вносящей значительный вклад в сохранение биоразнообразия наземных экосистем на национальном и глобальном уровнях.

Таким образом, цель работы – на основании оценки природоохранного потенциала заповедника доказать, что он является перспективной ООПТ. Задачи – оценить соответствие ПГРЭЗ критериям для объявления природной территории особо охраняемой (ст. 16 Закона № 150-3), сформулировать основные положения в части создания на базе ПГРЭЗ заповедника в рамках системы ООПТ.

Методы и объекты исследования. Объект исследования – ПГРЭЗ, его биологическое и ландшафтное разнообразие. Методы, используемые в работе, – обобщение и информационный анализ данных о биологическом и ландшафтном разнообразии ПГРЭЗ.

Результаты и их обсуждение. *Современное состояние проблемы исследования.* ПГРЭЗ был организован в соответствии с постановлением ЦК КПБ и Совета Министров БССР от 24.02.1988 № 59-5 в пределах белорусского сектора 30-километровой зоны отчуждения, выделенной в результате аварии на Чернобыльской АЭС, 18 июля 1988 г. на площади 131,3 тыс. га. В границы заповедника включили наиболее радиоактивно загрязненные территории Брагинского, Наровлянского, Хойникского, а также Мозырского и Калинковичского р-нов Гомельской обл., откуда было отселено более 22 тыс. жителей из 90 населенных пунктов. В 1993 г. на основании решения Гомельского областного Совета народных депутатов от 03.03.1993 № 71 территория ПГРЭЗ была увеличена до 215,4 тыс. га.

Территория лесного фонда ПГРЭЗ площадью 183,2 тыс. га отнесена к зоне эвакуации (отчуждения) и составляет 84,5 % от общей площади заповедника. Только территория двух лесничеств площадью 33,7 тыс. га относится к зоне последующего отселения, что составляет 15,5 % от общей площади ПГРЭЗ.

Заповедник был создан в целях осуществления комплекса мероприятий по предотвращению выноса радионуклидов за пределы его территории, изучения состояния природных растительных комплексов, животного мира, ведения радиационно-экологического мониторинга, а также проведения радиобиологических исследований. Современный правовой статус ПГРЭЗ регулируется Законом Республики Беларусь «О правовом режиме территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС» от 26.05.2012 № 385-3 (Закон № 385-3). Законодательный акт определяет цели функционирования ПГРЭЗ: ограничение доступа граждан на территории зон радиоактивного загрязнения, с которых эвакуировано и отселено население; обеспечение радиационной защиты населения; предотвращение распространения радионуклидов; ведение радиационного мониторинга; проведение радиоэкологических исследований; изучение животного и растительного мира, типичных и уникальных экосистем и ландшафтов, естественного течения природных процессов, характерных для Припятского Полесья. Помимо этого, на территории ПГРЭЗ выделены заповедная и экспериментально-хозяйственная зоны с определением допустимых видов деятельности в каждой из них.

Актуальные границы, площадь, состав земель (в том числе заповедной и экспериментально-хозяйственной зон), а также Положение о ПГРЭЗ утверждены Указом Президента Республики Беларусь от 21.01.2013 № 41 «О Полесском государственном радиационно-экологическом заповеднике». Так, площадь ПГРЭЗ составляет 217 173,8 га, где площадь заповедной зоны составляет – 148 964 га, экспериментально-хозяйственной зоны – 67 913 га.

Вместе с тем, выполняя важные природоохранные функции, ПГРЭЗ не является ООПТ, т. е. частью территории Республики Беларусь с ценными природными комплексами и (или) объекта-

ми, в отношении которой установлен особый режим охраны и использования (п. 4 ст. 1 Закона № 150-3). Термин «заповедник», присутствующий в названии, отражает скорее неприкосновенность и закрытость рассматриваемой территории от населения и не соответствует понятию, установленному в Законе № 150-3: территория, объявленная в целях обеспечения естественного течения природных процессов, сохранения в естественном состоянии и изучения ценных природных комплексов и объектов.

Обоснование изменения статуса ПГРЭЗ. Согласно ст. 16 Закона № 150-3 природная территория может быть объявлена особо охраняемой, если отвечает общим и специальным критериям. И чтобы сделать вывод о возможности изменения статуса ПГРЭЗ, необходимо проанализировать, в какой мере он им соответствует.

В п. 2 ст. 16 Закона № 150-3 приведены общие критерии при выборе природных территорий для объявления их заповедником, национальным парком, заказником.

Критерий 2.1. Наличие типичных и (или) редких природных ландшафтов и (или) биотопов.

Научные исследования, направленные на детальное изучение типичных и редких природных ландшафтов и биотопов, в ПГРЭЗ не проводились. Но если исходить из исследований, выполненных в рамках формирования национального сегмента Изумрудной сети в Республике Беларусь [1], и из положений ТКП 17.12-06-2021 (33140) «Правила выявления типичных и (или) редких биотопов, типичных и (или) редких природных ландшафтов, оформления их паспортов и охранных обязательств», в границах ПГРЭЗ можно выделить не менее 17 типичных и редких биотопов 5 групп (из 7 выделяемых) площадью около 17,4 % от всей территории заповедника:

биотопы травяных сообществ на сухих песчаных субстратах (1.1 – Псаммофитные травяные сообщества на кислых субстратах);

биотопы пресноводных водотоков и водоемов (2.1 – Олигомезотрофные озера с сообществами погруженных гидрофитов; 2.2 – Мезотрофные озера с сообществами харофитов; 2.3 – Мезотрофные и эвтрофные озера с сообществами погруженных и плавающих гидрофитов; 2.6 – Равнинные малые реки и ручьи);

биотопы естественных и полустественных лугов (4.6 – Мокрые луга с доминированием высокого разнотравья; 4.7 – Пойменные эвтрофные и мезотрофные луга сенокосного использования; 4.10 – Старые пастбищные и сенокосные луга с сохранившимися фрагментами древесной растительности);

биотопы болот (5.3 – Переходные болота; 5.5 – Родники и родниковые болота; 5.8 – Карбонатные болота; 5.9 – Низинные осоковые болота);

биотопы лесов (6.5 – Лиственные леса на избыточно увлажненных почвах и низинных болотах; 6.6 – Неморальные широколиственные леса с грабом; 6.8 – Лиственные леса в долинах рек; 6.9 – Пойменные дубравы).

Определение наличия типичных и редких природных ландшафтов, выполненное на основании анализа ландшафтной карты Республики Беларусь [2], говорит о том, что практически вся территория ПГРЭЗ может быть отнесена к ландшафтам, подлежащим специальной охране. Из них к группе редких природных ландшафтов относятся:

пойменные ландшафты, расположенные вдоль русла р. Припять (1.5.1 – Пойменные гривистые со злаковыми, местами остепненными лугами, пойменными дубравами на дерново-глеєватых и дерново-глеєвых почвах; 1.5.2 – Пойменные плоские со злаковыми лугами на дерново-глеєвых и гипново-осоковыми болотами на торфяно-болотных почвах);

ландшафты речных долин (1.6.1 – Долины с плоской поймой, лугами на дерновых заболоченных почвах, болотами на торфяно-болотных почвах; 1.6.2 – Долины с плоской поймой, локальными террасами, лугами на дерновых заболоченных почвах, болотами на торфяно-болотных почвах, сосновыми лесами на дерново-подзолистых почвах).

К группе типичных природных ландшафтов относятся аллювиальные террасированные ландшафты (2.4.1 – Плосковолнистые с дюнами, котловинами аллювиальные террасированные ландшафты с широко-лиственно-сосновыми и дубовыми лесами, внепойменными лугами, болотами; 2.4.2 – Волнисто-ложбинные аллювиальные террасированные ландшафты с сосновыми, широколиственно-сосновыми, пушистоберезовыми лесами, болотами), расположенные в основном на второй надпойменной террасе р. Припять.

Крытэрыі 2.2. Наличие мест обитания диких животных и (или) мест произрастания дико-растущих растений, относящихся к видам, включенным в Красную книгу Республики Беларусь, и (или) к видам, подпадающим под действие международных договоров Республики Беларусь.

Изучение флоры и фауны ПГРЭЗ носит направленный и систематический характер. За последние годы подготовлен ряд обзорных публикаций о биологическом разнообразии заповедника, которые включают сведения о видах диких животных и дикорастущих растениях, включенных в Красную книгу Республики Беларусь [3, 4]. Так, в настоящее время на территории ПГРЭЗ произрастает 43 вида сосудистых растений, 1 вид лишайников и 2 вида грибов, а также обитает 116 видов диких животных (14 видов млекопитающих, 63 вида птиц, 1 вид амфибий, 2 – рептилий и 36 видов насекомых), относящихся к видам, включенным в Красную книгу Республики Беларусь. Важно отметить, что в соответствии с Красным списком Международного союза охраны природы (МСОП) на территории ПГРЭЗ установлено обитание 6 видов диких животных, которые находятся в опасности (Endangered, EN) или в уязвимом положении (Vulnerable, VU), а также минимум 16 видов, близких к уязвимому положению (Near Threatened, NT). Это указывает на чрезвычайно высокую значимость территории заповедника для сохранения биоразнообразия не только на национальном, но и на глобальном уровне.

Особо стоит отметить, что 30-километровая буферная зона Чернобыльской АЭС, включая ПГРЭЗ и Чернобыльский радиационно-экологический биосферный заповедник (Украина), является единственным местом в Европе, где в условиях естественной свободы обитает лошадь Пржевальского (*Equus przewalskii* Poljakov, 1881), численность популяции которой составляет лишь несколько десятков особей [4] (согласно Красному списку МСОП относится к категории EN). Численность популяции большого подорлика (*Clanga clanga*) составляет 13 и более пар [4] с тенденцией к дальнейшему ее увеличению (согласно Красному списку МСОП – VU). В ПГРЭЗ сосредоточена наибольшая в Беларуси и одна из крупнейших в Европе популяция болотной черепахи (*Emys orbicularis*) численностью около 70 тыс. особей [4] (согласно Красному списку МСОП – NT).

Наблюдаемое увеличение численности ряда охраняемых видов растений и животных на территории ПГРЭЗ связано, на наш взгляд, с «запуском» восстановительных процессов растительного покрова после эвакуации населения и практически полного прекращения хозяйственной деятельности.

Крытэрыі 2.3. Наличие мест регулярного гнездования, зимовки или остановки в период миграции водно-болотных и других видов мигрирующих птиц в количестве, превышающем 1 % от численности национальной или европейской популяции вида.

При выделении ПГРЭЗ в качестве территории, важной для птиц международного значения (ТВП, Important Bird Area – участки, признанные важными для сохранения популяции птиц в рамках международной программы, созданной организацией BirdLife International, ИВА), было установлено, что в заповеднике гнездится 13 видов птиц численностью свыше 1 % от национальной (критерии B1, B2 по ИВА) или европейской (критерий A1 по ИВА) популяции видов [5], в частности черный аист (*Ciconia nigra*), большой и малый подорлики (*Aquila pomarina*), серый журавль (*Grus grus*) и др.

Крытэрыі 2.4. Наличие мест ежегодной концентрации в период сезонных миграций не менее 10 000 особей мигрирующих водно-болотных птиц (кулики, утки, гуси), не менее 500 особей серых журавлей.

На территории ПГРЭЗ не проводилась современная оценка численности водно-болотных видов птиц в период сезонных миграций. Но данные мониторинговых исследований орнитофауны заповедника, выполненных в 2005 г. [5], подтверждают наличие только 5 гнездящихся здесь видов уток (чирок-трескунок (*Anas querquedula*), чирок-свистунок (*Anas cyaeca*), кряква (*Anas platyrhynchos*), широконоска (*Anas clypeata*), серая утка (*Anas strepera*)), общее число особей которых превышает 10 тыс. Таким образом, численность водно-болотных птиц во время миграции превышает значение, установленное критерием 2.4.

Крытэрыі 2.5. Наличие мест нереста, нагула и миграции рыб, относящихся к видам, включенным в Красную книгу Республики Беларусь, и (или) к видам, подпадающим под действие международных договоров Республики Беларусь.

По итогам исследований, выполненных на территории ПГРЭЗ, виды рыб, включенные в Красную книгу Республики Беларусь, отмечены не были. Однако в списке фауны Чернобыльского

радиационно-экологического биосферного заповедника, непосредственно граничащего с ПГРЭЗ со стороны Украины, указан озерный голяк (*Phoxinus phoxinus*) [6]. Таким образом, вопрос, связанный с наличием мест нереста, нагула и миграции видов рыб, включенных в Красную книгу Республики Беларусь, непосредственно в границах ПГРЭЗ, требует дальнейшего изучения.

Критерий 2.6. Наличие природных территорий, включенных в национальную экологическую сеть.

ПГРЭЗ не включен в национальную экологическую сеть Республики Беларусь (экосеть) в качестве ее элемента, однако является логическим продолжением международного коридора «Припятский» (СЕ6) экосети, выделенного вдоль р. Припять. Отметим, что на серии предварительных карт-схем экосети, подготовленных в рамках ее выделения и обоснования, часть территории ПГРЭЗ включалась в состав речного коридора экосети.

Критерий 2.7. Наличие естественных водных объектов, форм рельефа, уникальных или редких по своему происхождению, морфометрическим и (или) иным характеристикам.

На экспертном уровне можно сделать вывод, что территория ПГРЭЗ в полной мере отвечает рассматриваемому критерию. В первую очередь необходимо отметить уникальность гидрографической сети, которая сформировалась благодаря системе естественных водоемов и водотоков в пойме р. Припять, большинство из которых находится в естественном или мало измененном состоянии. Это позволяет характеризовать гидрографическую сеть заповедника не только как уникальную, но и как эталонную. Река Припять пересекает ПГРЭЗ с северо-запада на юго-восток и является ключевым элементом системы: сильно извилистое русло, многочисленные протоки и рукава протяженностью свыше 120 км. На территории ПГРЭЗ в нее впадает еще 12 рек (Словечна, Брагинка, Вить, Желонь, Несвич, Рожавка и др.) общей протяженностью 257 км. Здесь насчитывается 1667 озер общей площадью около 2430 га, большинство из которых относится к старичному типу [7]. Характерной гидрологической особенностью территории является наличие высоких паводков, которые приводят к затоплению большей части поймы р. Припять и впадающих в нее притоков.

Кроме водных экосистем своеобразие ПГРЭЗ предает мозаичное сочетание уникальных и редких по своему происхождению, морфометрическим и иным характеристикам форм рельефа. Плосковолнистая и плоская поверхность озерно-аллювиальных равнин и долин рек осложнена дюнно-бугристыми формами, ложбинами стока, мелкозападинными участками с отчетливо выраженным грядово-ложбинным пойменным и дюнным микрорельефом. Над заболоченными в большинстве случаев замкнутыми низинами на 10–12 м возвышаются эоловые холмы вытянутых и округлых форм. Наибольшее разнообразие поверхности рельефа в ПГРЭЗ наблюдается в местах развития холмистых и линейно-грядовых аккумулятивных форм, связанных с ледниковой или эоловой деятельностью.

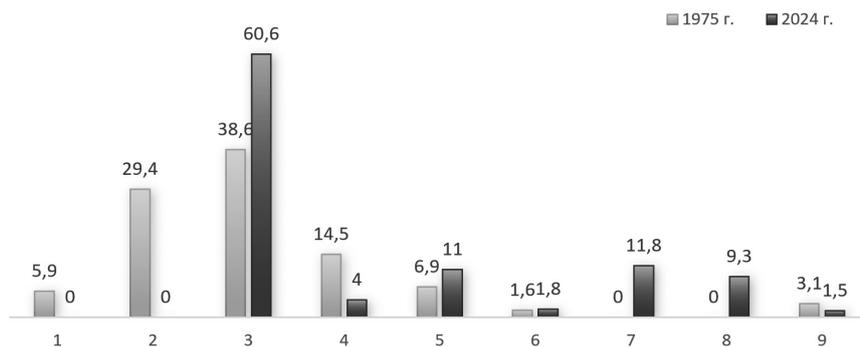
Для объявления природных территорий заповедником, национальным парком или заказником, помимо общих, предусмотрены также и 3 специальных критерия (п. 4 ст. 16 Закона № 150-3).

Критерий 4.1. Природная территория или ее значительная часть практически не нарушены антропогенной деятельностью за последние 75 и более лет.

Естественные природные сообщества в пределах современных границ ПГРЭЗ, которые условно можно отнести к категории практически не нарушенных антропогенной деятельностью, по состоянию на 1975 г. составляли 61,6 % от рассматриваемой территории. Так, лесные экосистемы занимали 38,6 %, луговые – 14,5 %, болотные – 6,9 %, водные – 1,6 % [8]. Антропогенные ландшафты к середине 1970-х гг. занимали 38,4 %, из них сельскохозяйственные земли (пашни, многолетние сеяные травы, пастбища) – 35,3 %, а прочие земли, включая населенные пункты, дороги и другое, – около 3 %. Спустя 38 лет после аварии на Чернобыльской АЭС (и почти 50 лет в разрезе анализируемых данных) доля лесных земель в пределах исследуемой территории составила 60,7 % (+22,1 %), лугов – 4,0 % (–10,5 %), болот – 11,0 % (+4,1 %). На месте бывших сельскохозяйственных земель сформировались пустоши (9,3 %), кустарниковые заросли (11,8 %), а также леса и болота (см. рисунок).

Критерий 4.2. Типичные и редкие природные ландшафты и биотопы составляют не менее 70 % от площади природной территории.

Как отмечалось выше, по предварительной оценке, доля типичных и редких биотопов на территории ПГРЭЗ составляет 17,4 % от общей территории заповедника и включает 17 типичных и редких биотопов из 5 групп. В тоже время экспертная оценка доли типичных и редких природных ландшафтов, выполненная на основании анализа ландшафтной карты Республики Беларусь, указывает на возможность отнесения к ландшафтам, подлежащим специальной охране, порядка 90 % территории ПГРЭЗ, что однозначно превышает показатель, установленный критерием 4.2.



Структура земельного фонда (%) до создания ПГРЭЗ (1975 г.) и в настоящее время (2024 г.):

1 – сельскохозяйственные земли на осушенных болотных почвах; 2 – сельскохозяйственные земли на минеральных почвах; 3 – леса; 4 – луга; 5 – болота; 6 – водные объекты или земли под водой; 7 – кустарники; 8 – пустоши и бросовые земли; 9 – прочие земли

Structure of the land fund (%) before creating PGRER (1975) and currently (2024):

1 – agricultural land on drained swamp soils; 2 – agricultural lands on mineral soils; 3 – forests; 4 – meadows; 5 – swamps; 6 – water bodies; 7 – bushes; 8 – wastelands; 9 – other lands

Критерий 4.3. Природная территория является местом обитания не менее 50 видов диких животных и (или) местом произрастания не менее 50 видов дикорастущих растений, относящихся к видам, включенным в Красную книгу Республики Беларусь, и (или) к видам, подпадающим под действие международных договоров Республики Беларусь.

Детально о видах, включенных в Красную книгу Республики Беларусь, мы рассказали выше (см. критерий 2.2).

Природная территория может быть выбрана для объявления ее заповедником в случае, если она отвечает не менее 3 общим и 3 специальным критериям (п. 7 ст. 16 Закона № 150-З). Анализ, результаты которого приведены выше, показывает, что территория ПГРЭЗ отвечает, как минимум, 5 общим (2.1, 2.2, 2.3, 2.4 и 2.7) и всем 3 специальным критериям, которые предъявляются к природным территориям для объявления их заповедниками.

Кроме соответствия территории ПГРЭЗ предусмотренным законодательством критериям, имеются иные веские аргументы для изменения статуса заповедника, основанные на оценке природоохранного, организационно-технического потенциала и радиационной обстановки.

1. ПГРЭЗ имеет статус ТВП [5]. ТВП «Полесский радиационный заповедник» (ИВА «Lower Pryati», международный код ИВА – ВУ035) объявлена в 2005 г. на площади 218,3 тыс. га. ТВП выделена на основании высокой международной и национальной значимости ПГРЭЗ для сохранения популяций 13 видов птиц, в том числе большого подорлика, дупеля (критерий А1 по ИВА), большой выпи (*Botaurus stellaris*), черного аиста, орлана-белохвоста (*Haliaeetus albicilla*), змеяда (*Circaetus gallicus*), малого подорлика, коростеля (*Crex crex*), серого журавля, малой крачки (*Sterna albifrons*), филина (*Bubo bubo*), обыкновенного зимородка (*Alcedo atthis*), золотистой щурки (*Merops apiaster*) (критерий В2 по ИВА) и малого погоньша (*Porzana parva*) (критерий В3 по ИВА).

2. ПГРЭЗ имеет статус Ключевой ботанической территории (КБТ) [9]. КБТ «Полесский заповедник» (Important Plant Area (IPA) «Polessky Reserve», международный код – ВУ IPA 007) выделена на площади 211,5 тыс. га. Основанием для этого стало соответствие территории ПГРЭЗ критериям программы IPA. Критерий А (наличие на территории видов, включенных в списки редких, исчезающих и в Красные книги разных уровней): на территории ПГРЭЗ установлено произрастание 6 видов растений, включенных в Приложения IIb и IVb к директиве Европейского Союза по местообитаниям. Критерий Б (общее видовое богатство территории): по состоянию на 2020 г. [3] на территории ПГРЭЗ зарегистрировано 1144 вида и 15 гибридов сосудистых растений, выявлено 315 мест произрастания из числа 43 видов сосудистых растений, 1 вида грибов и 2 видов лишайников, включенных в Красную книгу Республики Беларусь. Критерий В (наличие местообитаний, находящихся под угрозой исчезновения): на территории ПГРЭЗ выделяется 17 типичных и редких биотопов из 5 групп на площади около 34,9 тыс. га (17,4 % от площади ПГРЭЗ) [1].

3. Территория ПГРЭЗ (с учетом международной значимости как ИВА и ИРА) относится к ключевым территориям для сохранения биоразнообразия (Key Biodiversity Area) как участок, вносящий значительный вклад в глобальное сохранение биоразнообразия в наземных экосистемах в соответствии с использованием Глобального стандарта МСОП [10].

4. ПГРЭЗ является объектом Изумрудной сети «Нижняя Припять» («Lower Prypiats», международный код – ВУ0000060) на площади 218,3 тыс. га [1]: включен в сеть территорий особого общеевропейского природоохранного значения, направленных на охрану местообитаний видов, находящихся под угрозой исчезновения как на европейском континенте, так и во всем мире.

5. ПГРЭЗ не является Рамсарской территорией, однако он полностью отвечает критериям для выделения водно-болотных угодий международного значения, принятым 7-й конференцией Сторон Рамсарской конвенции (критерии 1, 2, 3, 5, 9).

6. ПГРЭЗ является потенциальной трансграничной ООПТ: с юга к нему примыкает Чернобыльский радиационно-экологический биосферный заповедник (Украина) площадью 226,9 тыс. га, созданный в 2016 г. с целью сохранения, возобновления и рационального использования типичных и уникальных природных комплексов Полесья, имеющих важное природоохранное, научное, эстетическое, рекреационное и оздоровительное значение. Эти две природоохранные территории представляют собой единый природный комплекс площадью свыше 450 тыс. га, что делает его самым крупным природным объектом, не имеющим аналогов в Европе.

7. В соответствии с Указом Президента Республики Беларусь от 14.11.2022 № 405 с 1 января 2023 г. ПГРЭЗ передан в подчинение Министерству природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь, в полномочие которого входит реализация единой государственной политики в области ООПТ, охраны биологического и ландшафтного разнообразия страны.

8. «Заповедный» режим для территории ПГРЭЗ действует уже более 35 лет. Для управления территорией создано и функционирует государственное природоохранное научно-исследовательское учреждение, в составе которого имеется развитая инфраструктура, научная часть (3 отдела, лаборатория и сектор), организационная и техническая базы. Осуществляются многолетние мониторинговые исследования, накоплен значительный объем научной информации, поддерживаются и пополняются базы данных. По уровню научных исследований и научного потенциала ПГРЭЗ стоит в одном ряду с Березинским биосферным заповедником и национальными парками страны.

9. Все земли ПГРЭЗ (99,9 %) находятся в землепользовании и управлении государственного природоохранного научно-исследовательского учреждения «Полесский государственный радиационно-экологический заповедник». При объявлении заповедника в рамках системы ООПТ будет отсутствовать необходимость изъятия земельных участков у землепользователей.

10. Законодательные акты, регулирующие функционирование ПГРЭЗ, не вступают в противоречие с режимами охраны и использования ООПТ. Более того, уже имеется практика, одобренная со стороны Минприроды, по созданию ООПТ в зонах радиоактивного загрязнения после аварии на ЧАЭС: за последнее десятилетие на таких землях объявлены заказники «Чериковский», «Славгородский», «Ветковский», «Струменский» и др. Для вышеперечисленных ООПТ, наряду с режимами их охраны и использования, установленными Законом № 150-З и Положениями о заказниках, действуют ограничения и запреты, предусмотренные Законом № 385-З.

11. В биогеоценозах ПГРЭЗ сосредоточено около 30 % цезия-137, выпавшего при аварии на Чернобыльской АЭС на территорию Беларуси, 73 % стронция-90 и 97 % изотопов плутония-238, 239, 240, 241 [8, 11]. Наличие в природных средах ПГРЭЗ изотопов трансурановой группы (плутоний-238, 239, 240 и америций-241) с периодами полураспада до нескольких десятков тысяч лет исключает возможность проживания людей и ведения интенсивной хозяйственной деятельности на загрязненных ими территориях в обозримом будущем. Наиболее оптимальным направлением использования таких земель с учетом их высокой значимости для сохранения биоразнообразия является объявление их ООПТ и развитие в качестве «полевой научной лаборатории», определяющей исследования экосистем и их компонентов в условиях минимальной антропогенной нагрузки, изучения радиационного аспекта и биологического разнообразия [12].

В случае объявления ПГРЭЗ заповедником в рамках системы ООПТ на его территории, наряду с нормами, предусмотренными в Законе № 150-З и в Положении о нем, будут соблюдаться ограничения и запреты, предусмотренные Законом № 385-З.

Помимо придания ПГРЭЗ статуса ООПТ, актуальными природоохранными направлениями на рассматриваемой территории остаются:

- включение территории ПГРЭЗ в национальную экологическую сеть Республики Беларусь в качестве ядра или коридора международного значения;
- придание статуса Рамсарской территории (водно-болотного угодья международного значения);
- разработка плана управления ПГРЭЗ.

Заключение. Проведенный анализ показал, что имеются веские аргументы для придания ПГРЭЗ статуса ООПТ. Оценка соответствия заповедника критериям, согласно которым природные территории относятся к заповедникам, показала, что ПГРЭЗ отвечает 5 общим (2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.7) и всем 3 специальным критериям. Границы заповедника (как ООПТ), режим его охраны и использования, функциональное зонирование, границы охранной зоны могут быть определены при подготовке научного и технико-экономического обоснования с учетом биологического разнообразия, радиационной обстановки, социально-экономического потенциала рассматриваемой территории. Предварительная оценочная площадь для создания заповедника – около 140 тыс. га, а остальную часть существующего ПГРЭЗ целесообразно включить в охранную зону заповедника. Сюда же необходимо отнести земли, в настоящее время входящие в экспериментальную зону ПГРЭЗ. Одним из наиболее рациональных путей использования заповедника может быть воспроизводство и сохранение редких, исчезающих, а также ресурсных видов животных и растений. Здесь могут как воспроизводиться резервные популяции этих видов для последующего расселения, так и разрабатываться технологии репатриации ранее полностью исчезнувших видов, интродукции и реинтродукции ценных видов или видов, имеющих высокий международный охранный статус, для их долгосрочного сохранения в масштабах всей Беларуси.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список использованных источников

1. Интеграция принципов Изумрудной сети в систему и схемы охраны окружающей среды на территории Беларуси / Н. А. Зеленкевич, Д. Г. Груммо, Н. М. Роговский [и др.] // Природные ресурсы. – 2022. – № 1. – С. 79–92.
2. Ландшафтная карта. Масштаб 1:1 250 000 // Национальный атлас Беларуси / Гос. ком. по земельным ресурсам, геодезии и картографии при Совете министров Респ. Беларусь; под ред. М. В. Мясниковича. – Минск, 2002. – С. 144–145.
3. Биологическое разнообразие Полесского радиационно-экологического заповедника: сосудистые растения / Д. В. Дубовик, А. Н. Скуратович, М. В. Кудин [и др.]; под ред. акад. В. И. Парфенова. – Минск: Беларус. навука, 2021. – 234 с.
4. Биологическое разнообразие животного мира Полесского государственного радиационно-экологического заповедника / М. Е. Никифоров, Е. И. Анисимова, К. В. Гомель [и др.]; под ред. акад. М. Е. Никифорова. – Минск: Беларус. навука, 2022. – 407 с.
5. Тэрыторыі, важныя для птушак у Беларусі: каталог / А. В. Абрамчук, С. В. Абрамчук, А. А. Астроўскі [і інш.]; пад агул. рэд. С. В. Левага. – Мінск: РЫФТУР ПРЫНТ, 2015. – 151 с.
6. Гащак, С. П. Позвоночные животные Чернобыльской зоны (Чернобыльского радиационно-экологического биосферного заповедника), включенные в Красную книгу Украины (2009 год) / С. П. Гащак // Проблеми Чорнобильської зони відчуження: науково-технічний збірник / М-во екології та природ. ресурсів України, Держ. агентство України з управління зоною відчуження; редкол.: В. В. Петрук (гл. ред.) [и др.]. – Славутич, 2018. – Вип. 18. – С. 5–55.
7. Гарбарук, Д. К. Природный потенциал территории Полесского государственного радиационно-экологического заповедника / Д. К. Гарбарук // Природные ресурсы Полесья: оценка, использование, охрана: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Пинск, 8–11 июня 2015 г.: в 2 ч. / Ин-т природопользования НАН Беларуси [и др.]; редкол.: В. С. Хомич (отв. ред.) [и др.]. – Пинск, 2015. – Ч. 1. – С. 81–85.
8. 35 лет после Чернобыльской катастрофы: итоги и перспективы преодоления ее последствий: национальный доклад Республики Беларусь / М. И. Автушко, О. Н. Антипенко, Ю. В. Байкова [и др.]; ред.: О. А. Соусь. – Минск: ИВЦ Минфина, 2020. – 152 с.
9. Ключевые ботанические территории Беларуси / О. М. Масловский, Г. А. Пронькина, В. И. Парфенов [и др.]; ред.: О. М. Масловский, Г. А. Пронькина. – М.; Минск: Представительство МСОП для России и стран СНГ [и др.], 2005. – 79 с.
10. A Global Standard for the Identification of Key Biodiversity Areas, Version 1.0, 2016 / International Union for Conservation of Nature and Natural Resources. – URL: <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/2016-048.pdf> (date of access: 20.11.2024).
11. Атлас современных и прогнозных аспектов последствий аварии на Чернобыльской АЭС на пострадавших территориях России и Беларуси (АСПА Россия – Беларусь) / И. М. Богдевич, Ю. А. Израэль, В. С. Аверин [и др.]; под ред. Ю. А. Израэля, И. М. Богдевича. – М.: Фонд «Инфосфера» – НИА – Природа; Минск: Белкартография, 2009. – 138 с.
12. Кудин, М. В. Аспекты развития Полесского государственного радиационно-экологического заповедника / М. В. Кудин // Радиоэкологические последствия радиационных аварий: к 35-й годовщине аварии на ЧАЭС: сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф., Обнинск, 22–23 апр. 2021 г. / ФГБНУ «Всерос. науч.-исслед. ин-т радиологии и агроэкологии»; редкол.: Н. И. Санжарова, В. М. Шершаков. – Обнинск, 2021. – С. 344–347.

References

1. Zelenkevich N. A., Grummo D. G., Rogovskii N. M., Timashkova A. V., Sozinov O. V. Integration of the Emerald Network principles into the system of territorial nature protection of the Republic of Belarus. *Prirodnye resursy* [Natural resources], 2022, no. 1, pp. 79–92 (in Russian).
2. Landscape map. Scale 1:1 250 000. *National Atlas of Belarus*. Minsk, 2002, pp. 144–145 (in Russian).
3. Dubovik D. V., Skuratovich A. N., Kudin M. V., Garbaruk D. K., Uglyanets A. V., Savchuk S. S., Saulov A. O., Turchin L. M., Shumak S. V. *Biological diversity of the Polesie radiation-ecological reserve: vascular plants*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2021. 234 p. (in Russian).
4. Nikiforov M. E., Anisimova E. I., Homel K. V., Dombrovskii V. Ch., Zhuravlev D. V., Ivantsov D. N., Krishchuk I. A. [et al.]. *Biological diversity of fauna of the Polesie State radiation-ecological reserve*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2022. 407 p. (in Russian).
5. Abramchuk A. V., Abramchuk S. V., Astrouski A. A., Bagdanovich I. A., Bakur Yu. Yu., Byalova K. A. [et al.]. *Areas important for birds in Belarus*. Minsk, RYFTUR PRYNT Publ., 2015. 151 p. (in Belarusian).
6. Gashchak S. P. Vertebrate animals of the Chernobyl zone (Chernobyl radiation and ecological biosphere reserve), included in the Red Book of Ukraine (2009). *Problemi Chornobil's'koï zoni vidchuzhennya: naukovo-tekhnichnii zbirnik* [Problems of the Chernobyl Exclusion Zone: a scientific and technical collection]. Slavutich, 2018, iss. 18, pp. 5–55 (in Russian).
7. Garbaruk D. K. Natural potential of the territory of the Polesky State radiation-ecological reserve. *Prirodnye resursy Poles'ya: otsenka, ispol'zovanie, okhrana: materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Pinsk, 8–11 iyunya 2015 goda. Chast' 1* [Natural resources of Polesie: assessment, use, protection: materials of the International scientific and practical conference, Pinsk, June 8–11, 2015. Pt. 1]. Pinsk, 2015, pp. 81–85 (in Russian).
8. Avtushko M. I., Antipenko O. N., Baikova Yu. V., Bakarikova Zh. V., Bogdevich I. M., Bolbatovskii G. N. [et al.]. *35 years after the Chernobyl disaster: results and prospects for overcoming its consequences: national report of the Republic of Belarus*. Minsk, IVTs Minfina Publ., 2020. 152 p. (in Russian).
9. Maslovskii O. M., Pron'kina G. A., Parfenov V. I., Pugachevskii A. V., Tret'yakov D. I., Stepanovich I. M. [et al.]. *Important Plant Areas in Belarus*. Moscow, Minsk, IUCN Representative Office for Russia and CIS countries, 2005. 79 p. (in Russian).
10. *A Global Standard for the Identification of Key Biodiversity Areas, Version 1.0, 2016*. Available at: <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/2016-048.pdf>. (accessed 20.11.2024).
11. Bogdevich I. M., Izrael' Yu. A., Averin V. S., Belov A. A., Avramenko T. V. *The Atlas of recent and predictable aspects of consequences of Chernobyl accident on polluted territories of Russia and Belarus (ARPA Russia-Belarus)*. Moscow, Infosphere Foundation – NIA–Nature Publ., Minsk, Belkartografiya Publ., 2009. 138 p. (in Russian).
12. Kudin M. V. Aspects of development of the Polesie State radiation-ecological reserve. *Radioekologicheskie posledstviya radiatsionnykh avarii: k 35-oi godovshchine avarii na ChAES: sbornik dokladov mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Obninsk, 22–23 aprelya 2021 goda* [Radioecological consequences of radiation accidents: on the 35th anniversary of the Chernobyl accident: collection of reports from the international scientific and practical conference, Obninsk, April 22–23, 2021]. Obninsk, 2021, pp. 344–347 (in Russian).

Информация об авторах

Чайковский Александр Иванович – канд. биол. наук, генеральный директор. Научно-практический центр НАН Беларуси по биоресурсам (ул. Академическая, 27, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: chai-kovski@tut.by

Кудин Максим Владимирович – канд. с.-х. наук, доцент, заместитель директора по научной работе. Полесский государственный радиационно-экологический заповедник (ул. Терешковой, 7, 247618, г. Хойники, Республика Беларусь). E-mail: max.kudin@mail.ru

Груммо Дмитрий Геннадьевич – канд. биол. наук, доцент, директор. Институт экспериментальной ботаники им. В. Ф. Купревича НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: zm.hrumo@gmail.com

Максименков Михаил Викторович – ст. науч. сотрудник. Научно-практический центр НАН Беларуси по биоресурсам (ул. Академическая, 27, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: maksimenkovm@gmail.com

Устин Владимир Владимирович – заведующий сектором. Научно-практический центр НАН Беларуси по биоресурсам (ул. Академическая, 27, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: zapovednoedelo@gmail.com

Information about the authors

Alexander I. Tchaikovsky – Ph. D. (Biol.), General Director. Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Bioresources (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: chai-kovski@tut.by

Maksim V. Kudin – Ph. D. (Agr.), Associate Professor, Deputy Director. Polesie State Radiation and Ecological Reserve (7, Tereshkova Str., 247618, Khoyniki, Republic of Belarus). E-mail: max.kudin@mail.ru

Dmitry G. Grummo – Ph. D. (Biol.), Associate Professor, Director. V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: zm.hrumo@gmail.com

Mikhael V. Maksimenkov – Senior Researcher. Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Bioresources (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: maksimenkovm@gmail.com

Vladimir V. Ustin – Head of the Department. Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Bioresources (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: zapovednoedelo@gmail.com