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

ВЕСЦІ
НАЦЫЯНАЛЬНАЙ АКАДЭМІІ НАВУК БЕЛАРУСІ

СЕРЫЯ БІЯЛАГІЧНЫХ НАВУК. 2026. Т. 71, № 4

ИЗВЕСТИЯ
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ

СЕРИЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ НАУК. 2026. Т. 71, № 4

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 Беларуси по биоресурсам, Минск, Республика Беларусь

Т. В. Смирнова (*ведущий редактор журнала*) – Издательский дом «Беларуская навука», Минск, Республика Беларусь

З. М. Алещенкова – Институт микробиологии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

И. Д. Волотовский – Институт биофизики и клеточной инженерии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

А. Е. Гончаров – Институт биофизики и клеточной инженерии Национальной академии наук Беларуси, 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
О. М. Масловский – 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. 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
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
О. Н. Пугачев – Зоологический институт Российской академии наук, Санкт-Петербург, Российская Федерация
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. 2026. Т. 71, № 4.
Выходит на русском, белорусском и английском языках

Редактор *Т. В. Смирнова*
Компьютерная верстка *М. Э. Маляревич*

Подписано в печать 16.10.2026. Выход в свет 28.10.2026. Формат 60×84$^{1}/_{8}$. Бумага офсетная.
Печать цифровая. Усл. печ. л. 10,23. Уч.-изд. л. 11,3. Тираж 70 экз. Заказ 209.
Цена номера: индивидуальная подписка – 16,33 руб., ведомственная подписка – 36,06 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, 2026

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

PROCEEDINGS
OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS

BIOLOGICAL SERIES. 2026, vol. 71, no. 4

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)

E d i t o r-i n-C h i e f

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

E d i t o r i a l B o a r d

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*) – Publishing House "Belaruskaya Navuka", Minsk, Republic of Belarus
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
Oleg M. Maslovskiy – 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 V. Titok – Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus
Vladimir I. Torchik – Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus
Igor D. Volotovski – 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
Yuri Yu. Dgebuadze – A. N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
Vasiliy 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
Oleg N. Pugachev – Zoological Institute of the Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg, Russian Federation
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, 2026, vol. 71, no. 4.
Printed in Russian, Belarusian and English languages

Editor *T. V. Smirnova*
Computer imposition *M. E. Maliarevich*

Sent for press 16.10.2026. Output 28.10.2026. Format 60×84$^{1}/_{8}$. Offset paper.
Digital press. Printed sheets 10.23. Publisher's signatures 11.3. Circulation 70 copies. Order 209.
Number price: individual subscription – 16.33 byn., departmental subscription – 36.06 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: 40, F. Skorina Str., 220084, Minsk, Republic of Belarus.

© RUE "Publishing House "Belaruskaya Navuka",
Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological series, 2026

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

ЗМЕСТ

Рупасова Ж. А., Коломиец Э. И., Павловский Н. Б., Авраменко С. Н., Алещенкова З. М. Влияние плодородия почвы и биологических стимуляторов роста на антиоксидантный комплекс плодов *Vaccinium corymbosum* L. 271

Орловская О. А., Яцевич К. К., Милько Л. В., Кильчевский А. В. Анализ генов, ассоциированных с массой тысячи зерен, у линий мягкой пшеницы с интрогрессиями чужеродного генетического материала 282

Боровик А. А., Небышинец П. А., Самович Т. В., Ламан Н. А. Физиолого-биохимические особенности роста проростков сахарной свеклы при предпосевной обработке семян брассиностероидами 292

Севницкая Н. Л., Усеня В. В., Хвасько А. В., Козел А. В., Тегленков Е. А., Сувалов Н. А., Ганебная А. В. Оценка эффективности биологического препарата «ИПСБОВЕР» для регулирования численности короедов в формирующихся очагах в хвойных насаждениях Беларуси и методы его применения..... 300

Роговский Н. М., Груммо Д. Г. Динамика усыхания и устойчивость лесных насаждений к климатическому стрессу: дистанционный мониторинг с применением алгоритмов машинного обучения..... 315

Шафорост А. С., Воропаев Е. В., Галиновская Н. В., Зятьков А. А., Осипкина О. В., Барбарович А. А. Анализ транскриптома мононуклеарных клеток периферической крови у пациентов с состоянием после COVID-19 на основе данных нанопорового секвенирования..... 332

Вишневская М. В., Пинчук П. Ю., Чиркин А. А. Морфологические изменения гепатопанкреаса пресноводных моллюсков при воздействии алифатических спиртов с разной длиной углеродной цепи 344

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

CONTENTS

Rupasova Zh. A., Kolomiets E. I., Pavlovsky N. B., Avramenko S. N., Aleschenkova Z. M. The influence of soil fertility and biological growth stimulants on the antioxidant complex of *Vaccinium corymbosum* L. fruits..... 271

Orlovskaya O. A., Yatsevich K. K., Milko L. V., Kilchevsky A. V. Analysis of genes associated with thousand grain weight in common wheat lines with alien genetic material introgressions..... 282

Borovik A. A., Nebyshinets P. A., Samovich T. V., Laman N. A. Physiological and biochemical features of sugar beet seedling growth under pre-sowing seed treatment with brassinosteroids 292

Sevnitskaya N. L., Usenya V. V., Khvasko A. V., Kozel A. V., Teglenkov E. A., Suvalov N. A., Ganebnaya A. V. Efficacy assessment of the biological preparation IPSBOVER for regulating bark beetle populations in emerging outbreaks in coniferous stands of Belarus and methods of its application 300

Rogovsky N. M., Grummo D. G. Forest loss dynamics and resilience to climate stress: a machine learning approach using remote sensing data 315

Shaforost A. S., Voropaev E. V., Halinouskaya N. V., Ziatskov A. A., Osipkina O. V., Barbarovich A. A. PBMC transcriptome analysis in long COVID patients based on nanopore sequencing data 332

Vishnevskaya M. V., Pinchuk P. Yu., Chirkin A. A. Morphological changes in the hepatopancreas of freshwater mollusks exposed to aliphatic alcohols with different carbon chain lengths 344

ISSN 1029-8940 (Print)
ISSN 2524-230X (Online)
УДК: 634.737:631.452:631.811.98
https://doi.org/10.29235/1029-8940-2026-71-4-271-281

Поступила в редакцию 18.05.2026
Received 18.05.2026

Ж. А. Рупасова[1], Э. И. Коломиец[2], Н. Б. Павловский[3], С. Н. Авраменко[3], З. М. Алещенкова[4]

[1]Институт экспериментальной ботаники имени В. Ф. Купревича Национальной академии наук, Минск, Республика Беларусь
[2]Государственное научно-производственное объединение «Химический синтез и биотехнологии», Минск, Республика Беларусь
[3]Центральный ботанический сад Национальной академии наук, Минск, Республика Беларусь
[4]Институт микробиологии Национальной академии наук, Минск, Республика Беларусь

ВЛИЯНИЕ ПЛОДОРОДИЯ ПОЧВЫ И БИОЛОГИЧЕСКИХ СТИМУЛЯТОРОВ РОСТА НА АНТИОКСИДАНТНЫЙ КОМПЛЕКС ПЛОДОВ *VACCINIUM CORYMBOSUM* L.

Аннотация. Приведены результаты сравнительного исследования влияния биологических препаратов ростостимулирующего действия – Оксидата торфа «Голубика» с микроэлементами в концентрации 0,4 % и нового микробного препарата Экоберит в концентрациях 2, 4 и 8 % на антиоксидантную и ферментативную активность плодов голубики высокорослой, полученные в рамках двух полевых опытов с низким и высоким уровнем плодородия почвы в Южной агроклиматической зоне республики (Ганцевичский р-н Брестской обл.).

Установлено, что, независимо от состояния агрохимического фона, наиболее эффективным агроприемом, обеспечившим максимальную защиту клеточных структур от окислительного стресса, следовало признать внесение в приствольную зону посадок голубики 0,4%-го раствора Оксидата торфа. Показано, что на почве с низким уровнем плодородия использование 4%-го раствора Экоберита уступало лидирующему агроприему по эффективности в 1,5 раза, а при использовании 8%-го – в 5 раз при абсолютной неэффективности его 2%-го раствора. На почве с высоким уровнем плодородия общий уровень антиоксидантной защиты при применении Оксидата торфа почти вдвое уступал таковому на менее плодородной почве при абсолютном доминировании негативного влияния Экоберита на комплекс антирадикальных свойств плодов, наиболее выраженного при применении его 8%-го и уступавшего ему в 1,3 раза по данному признаку 4%-го раствора.

Ключевые слова: уровень плодородия почвы, регуляторы роста Экоберит, Оксидат торфа, голубика высокорослая, плоды, антиоксидантная активность, окислительно–восстановительные ферменты каталаза, пероксидаза, полифенолоксидаза, супероксиддисмутаза

Для цитирования: Влияние плодородия почвы и биологических стимуляторов роста на антиоксидантный комплекс плодов *Vaccinium corymbosum* L. / Ж. А. Рупасова, Э. И. Коломиец, Н. Б. Павловский [и др.] // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя біялагічных навук. – 2026. – Т. 71, № 4. – С. 271–281. https://doi.org/10.29235/1029-8940-2026-71-4-271-281

Zhanna A. Rupasova[1], Emilia I. Kolomiets[2], Nikolay B. Pavlovsky[3], Stanislav N. Avramenko[3], Zinaida M. Aleschenkova[4]

[1]V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences, Minsk, Republic of Belarus
[2]State Research and Production Association "Chemical Synthesis and Biotechnology", Minsk, Republic of Belarus
[3]Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences, Minsk, Republic of Belarus
[4]Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Btlarus

THE INFLUENCE OF SOIL FERTILITY AND BIOLOGICAL GROWTH STIMULANTS ON THE ANTIOXIDANT COMPLEX OF *VACCINIUM CORYMBOSUM* L. FRUITS

Abstract. The article presents the results of a comparative study conducted in the southern agroclimatic zone of the republic (Gantsevichi District, Brest Region) within two field trials with low and high soil fertility. The study examined the effects of growth-promoting biological preparations – Golubika Peat Oxidate with microelements at a concentration of 0.4 % and the new microbial preparation Ecoberit at concentrations of 2, 4, and 8 % – on the antioxidant and enzymatic activity of highbush blueberry fruits. It was established that, regardless of the agrochemical background, the most effective agricultural practice, providing maximum protection of cellular structures from oxidative stress, was the application of a 0.4 % solution of Peat Oxidate to the near-trunk zone of blueberry plantings. It was shown that on low-fertility soil, the use of a 4 % Ecoberit solution was 1.5 times less effective than the leading agricultural practice; while the 8 % solution was 5 times less effective; and while the 2 % solution was completely ineffective. On high-fertility soil, the overall antioxidant protection level with Peat Oxidate was almost half that of less fertile soil, while the negative impact of Ecoberit on the antiradical properties of fruits was absolutely dominant. This was most pronounced with the 8 % solution, while the 4 % solution was 1.3 times less effective.

Keywords: soil fertility, growth stimulants Ecoberit, Peat Oxidate, highbush blueberry, fruits, antioxidant activity, redox enzymes, catalase, peroxidase, polyphenol oxidase, superoxide dismutase

For citation: Rupasova Zh. A., Kolomiets E. I., Pavlovsky N. B., Avramenko S. N., Aleschenkova Z. M. The influence of soil fertility and biological growth stimulants on the antioxidant complex of *Vaccinium corymbosum* L. fruits. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya biyalagichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological series*, 2026, vol. 71, no. 4, pp. 271–281 (in Russian). https://doi.org/10.29235/1029-8940-2026-71-4-271-281

Введение. В связи с совершенствованием технологии возделывания голубики высокорослой с соблюдением принципов органического земледелия, способствующих получению экологически чистой ягодной продукции, в рамках Государственной научно-технической программы «Перспективные химические и биологические технологии» на 2021–2025 гг., подпрограммы «Промышленные биотехнологии–2025», проведена комплексная оценка эффективности разработанного в ГНПО «Химический синтез и биотехнологии» микробного ростостимулирующего препарата Экоберит. Уже доказано его позитивное влияние на ростовые и биопродукционные характеристики, а также на биохимический состав плодов голубики [1, 2]. Вместе с тем на фоне применения данного препарата установлена существенная зависимость данных показателей, как и содержания широкого спектра биологически активных соединений, в том числе биофлавоноидов, от уровня плодородия почвы [3–5], что явилось основой для предположения о наличии подобной зависимости и для антиоксидантных свойств плодов, являющихся важнейшей характеристикой ягодной продукции этой культуры. Для решения данной задачи было проведено сравнительное исследование в рамках полевых экспериментов на почвах с разным уровнем плодородия антиоксидантной активности (АОА) плодов опытных растений, а также активности основных ферментов окислительно-восстановительного цикла – каталазы (КАТ), пероксидазы (ПО), полифенолоксидазы (ПФО), а также супероксиддисмутазы (СОД).

В основу этой работы положены результаты сравнительного исследования влияния биологических препаратов ростостимулирующего действия – Оксидата торфа «Голубика» с микроэлементами и трех концентраций нового испытываемого микробного препарата Экоберит на обозначенные компоненты антиоксидантного комплекса плодов голубики в зависимости от состояния агрохимического фона. Первый препарат представляет собой водный концентрат биологически активных веществ, содержащихся в природном продукте – торфе. В его состав входят гуминовые и фульвовые кислоты (до 80 %), 16 аминокислот, из которых 9 незаменимых, моно- и полисахариды, фенолы, гемицеллюлоза, макро- и микроэлементы (Ca, Mg, N, P, K, Na, S, Fe, J, Co, Mn, Zn и др.), а также производные витаминов группы B, витамины D, D_3, PP, нафтеновая кислота и хиноны. Микробный препарат Экоберит представляет собой консорциум из штаммов бактерий рода *Bacillus*, обладающий ростостимулирующей, антимикробной, азотфиксирующей и фосфатмобилизующей активностями.

Материалы и методы исследования. Исследования выполнены в Ганцевичском р-не Брестской обл. на примере модельного сорта Bluecrop в рамках двух полевых опытов, один из которых был заложен в посадках голубики на экспериментальном участке отраслевой лаборатории интродукции и технологии ягодных растений Центрального ботанического сада (ЦБС) НАН Беларуси (ЭБ), а второй – в производственных насаждениях данной культуры на территории расположенного в 10 км севернее Крестьянско-фермерского хозяйства (КФХ) «Ягодное лукошко». В первом эксперименте почва под опытными растениями – торфяно-глеевая, мелиорированная, развитая на слое пушицево-сфагнового верхового торфа, подстилаемом с глубины 50 см рыхлым разнозернистым песком. Торф – среднеразложившийся, с зольностью 15 % и содержанием P_2O_5 – 131 мг/кг, K_2O – 180 мг/кг, Ca – 246 мг/кг, Mg – 32 мг/кг. Реакция почвенного раствора (pH_{H_2O}) в приствольной зоне посадок голубики варьировалась в диапазоне 4,9–6,2, тогда как у мульчирующего слоя (древесные опилки) она составляла 4,9–5,3, а в междурядьях – 4,7–5,1.

Почва на участке КФХ «Ягодное лукошко» – дерново-подзолистая, супесчаная, с содержанием гумуса 3,5 %, P_2O_5 – 285 мг/кг, K_2O – 74 мг/кг, Ca – 982 мг/кг, Mg – 124 мг/кг. Реакция почвенного раствора (pH_{H_2O}) в приствольной зоне посадок голубики соответствовала области более низких и более благоприятных для данной культуры, нежели на предыдущем участке, значений: от 3,8 до 4,9 при pH мульчирующего слоя (древесные опилки) в пределах 4,7–4,8, а в междурядьях – 5,0–5,7. В данном эксперименте были созданы посадки сходных по габитусу одновоз-

растных генеративных растений модельного сорта голубики, приствольная полоса которых замульчирована отходами деревообработки (опилки, щепа, кора) слоем толщиной 10 см и шириной 1,2 м, а сами посадки оборудованы капельным орошением, обеспечивающим также подкисление субстрата и дополнительное поступление основных питательных элементов в виде растворов аммиачной селитры, солей калия и фосфора. Это способствовало улучшению агрохимических свойств почвы, обусловившему более высокий уровень ее плодородия в опытных посадках голубики на территории КФХ, нежели на экспериментальном участке отраслевой лаборатории ЦБС, что, на наш взгляд, не могло не отразиться на состоянии энзимо-антиоксидантного комплекса плодов на фоне применения испытываемых регуляторов роста.

Схема опыта на ЭБ включала 5 вариантов: 1 – контроль (обработка приствольной зоны растений водой); 2 – внесение 0,4%-го водного раствора Оксидата торфа; 3–5 – внесение водных растворов микробного препарата Экоберит в концентрациях 2, 4 и 8 %. На территории КФХ «Ягодное лукошко» схема опыта включала 4 варианта: 1 – контроль (обработка водой); 2 – внесение 0,4%-го водного раствора Оксидата торфа; 3, 4 – внесение водных растворов препарата Экоберит в концентрациях 4 и 8 %. В обоих экспериментах использование обозначенных препаратов осуществляли путем внесения 1 л приготовленного раствора под каждый куст голубики в начале фазы бутонизации и далее 4 раза с интервалом 15–20 дней до начала созревания плодов. Последнее внесение препаратов проводили за 2 недели до сбора ягод.

В обоих экспериментах в период созревания плодов проводили повариантное определение АОА этанольных экстрактов из свежих плодов с использованием 2,2-дифенил-1-пикрилгидразила [6, 7], активность ПО – по методу А. Н. Бояркина [8]; ПФО – с пирокатехином [9]; КАТ – по методу А. Н. Баха и А. И. Опарина [10]; СОД – по методу Y. P. Misra, I. Fridovich [11]. Для пересчета обозначенных показателей на сухую массу плодов определяли содержание в них сухих веществ по ГОСТ 28561-90[1]. Все аналитические определения выполнены в двукратной биологической и трехкратной аналитической повторностях. Данные статистически обработаны с использованием программы Excel [12].

Результаты и их обсуждение. По нашим оценкам, приведенным в табл. 1, в сравниваемых полевых экспериментах, проведенных на менее и более плодородной почве (ЭБ и КФХ), общий уровень АОА этанольных экстрактов из плодов голубики при 30-минутной экспозиции варьировался в весьма широких, но вместе с тем довольно близких диапазонах, составлявших в мкмоль экв. тролокса / г сухого вещества 52,7–102,6 и 72,1–108,1 при расхождении крайних значений соответственно в 1,9 и 1,5 раза.

Таблица 1. **Уровень АОА этанольных экстрактов из плодов *V. corymbosum* в вариантах полевых опытов с применением ростостимулирующих препаратов, мкмоль экв. тролокса / г сухого вещества**

Table 1. **The level of antioxidant activity of ethanol extracts from *V. corymbosum* fruits in field experiments using growth-stimulating preparations, μmol equiv trolox / g dry matter**

Вариант опыта	$\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$	*t*
	Эксперимент на территории ЭБ	
Контроль	**88,8 ± 0,7**	–
Оксидат торфа 0,4 %	102,6 ± 0,5	15,7*
Экоберит 2 %	52,7 ± 0,4	–44,0*
Экоберит 4 %	67,9 ± 0,3	–26,4*
Экоберит 8 %	80,4 ± 0,3	–10,4*
	Эксперимент на территории КФХ	
Контроль	**108,1 ± 0,8**	–
Оксидат торфа 0,4 %	96,1 ± 1,2	–8,3*
Экоберит 4 %	72,1 ± 0,6	–35,6*
Экоберит 8 %	74,2 ± 0,7	–31,0*

Примечание. Здесь и в табл. 2 * отмечены статистически значимые по *t*-критерию Стьюдента различия с контролем при $p < 0,05$.

[1] Продукты пищевые консервированные. Методы определения сухих веществ: ГОСТ 8756.2-82. – Введен 01.01.1983. – М.: Изд-во стандартов,1982. – 5 с.

Значительная ширина приведенных диапазонов косвенно свидетельствовала о существенной зависимости уровня АОА плодов не только от воздействия испытываемых агроприемов, но и от состояния агрохимического фона, причем заметное их сужение в опыте на более плодородной почве указывало на ослабление данной зависимости по сравнению с опытом на менее плодородной. При этом в контрольном варианте эксперимента на территории КФХ величина АОА превышала таковую в опыте на ЭБ в 1,2 раза, тогда как на фоне применения стимуляторов роста в обоих случаях были получены практически сопоставимые результаты, свидетельствовавшие также о наибольшем ее значении при использовании Оксидата торфа. Вместе с тем на фоне внесения Экоберита в общих для обоих экспериментов вариантах уровень АОА оказался ниже, чем в данном случае, в 1,3–1,5 раза (на ЭБ) и в 1,3 раза (в КФХ) при наименьшем отставании при использовании максимальной концентрации микробного препарата.

Результаты определения активности основных ферментов окислительно-восстановительного цикла в пересчете на сухое вещество плодов голубики, приведенные в табл. 2, показали, что ее значения варьировались в рамках полевых экспериментов на ЭБ и в КФХ в следующих диапазонах: для КАТ – 12,97–27,85 и 5,17–18,18 мкмоль H_2O_2 / (г · мин); ПО – 7,05–14,17 и 7,41–11,58 ед. опт. плотн. / (г · мин); ПФО – 383,5–1 313,7 и 485,1–935,9 ед. опт. плотн. / (г · мин); СОД – 4,36–9,93 и 4,08–12,11 отн. ед. / мг белка. Как видим, приведенные диапазоны варьирования активности большинства оксидаз в рамках эксперимента на менее плодородной почве соответствовали области более высоких значений, нежели на более плодородной, и лишь для активности СОД, как и для АОА, показана слабо выраженная противоположная закономерность. При этом в опыте на ЭБ максимальный уровень активности КАТ установлен на фоне внесения 4%-го и 8%-го раствора Экоберита, а минимальный – в контроле, тогда как в опыте на территории КФХ наибольшая активность данного фермента выявлена, напротив, в контроле, а наименьшая – при использовании 8%-го Экоберита и Оксидата торфа, при применении которого на менее плодородной почве установлен минимальный уровень активности ПО, тогда как максимальный – при внесении 4%-го раствора микробного препарата. В эксперименте на почве с более высоким уровнем плодородия при использовании Оксидата торфа был получен противоположный эффект, свидетельствовавший, напротив, о наибольшей активности ПО, сопоставимой с таковой при внесении 8%-го Экоберита, при чрезвычайно слабом ее проявлении в контрольном варианте опыта (табл. 2).

Обращает на себя внимание то, что, независимо от уровня плодородия почвы, минимальным в рамках экспериментов показателям активности ПО соответствовали максимальные значения активности ПФО, что обусловлено взаимозаменяемостью данных ферментов в метаболических процессах. Общеизвестно, что, несмотря на разные механизмы действия (ПФО использует кислород, а ПО – пероксид водорода), их функции могут частично перекрываться или дополнять друг друга, играя ключевую, часто синергетическую роль в фенольном метаболизме растений, особенно в стрессовых условиях [13, 14], что особенно важно для плодов голубики, чрезвычайно богатых полифенолами.

По нашим данным, в эксперименте на территории ЭБ наибольшую активность ПФО в плодах голубики обеспечивало использование Оксидата торфа, а наименьшую – внесение Экоберита, особенно в 2%-й концентрации (табл. 2). В опыте на территории КФХ максимальной активностью данного фермента, как и КАТ, характеризовалась продукция контрольного варианта, а минимальной, как и в эксперименте на ЭБ, продукция, полученная в вариантах с использованием микробного препарата, особенно внесенного в наибольшей концентрации, при наличии четко выраженной обратной взаимозависимости между активностью ПФО и ПО. Что касается СОД, то в отличие от предыдущих энзимов, в обоих полевых экспериментах обнаружены сходные тенденции в изменении ее активности при отсутствии существенных различий данного показателя на фоне испытываемых агроприемов. При этом в обоих случаях максимальный уровень активности СОД выявлен при использовании Оксидата торфа, а минимальный – при внесении 4%-го Экоберита.

Как видим, показатели активности большинства окислительно-восстановительных ферментов, как и АОА, определялись не только воздействием на растения стимуляторов роста, но и уровнем

плодородия почвы, и лишь для СОД ключевое значение в этом плане принадлежало первому фактору. С целью установления степени трансформации энзимо-антиоксидантного комплекса плодов голубики при использовании стимуляторов роста в зависимости от эдафического фактора в тестируемых вариантах полевых опытов определены относительные различия с контролем активности его основных компонентов, приведенные в табл. 3. Как видим, в обоих полевых экспериментах применение испытываемых препаратов способствовало снижению общего уровня АОА этанольных экстрактов из плодов голубики, особенно при более высоком плодородии почвы. Это могло свидетельствовать, с одной стороны, об ослаблении воздействия на них окислительного стресса и связанного с ним уменьшения в клетках содержания активных форм кислорода (АФК), сопровождавшегося ограничением накопления антиоксидантов вторичной природы [15]. С другой стороны, показанное в работе Ж. А. Рупасовой с соавт. [16] увеличение урожайности плодов на фоне внесения Экоберита могло привести к снижению концентрации антиоксидантов на единицу их массы даже при достаточно высоком общем количестве активных соединений. При этом лишь в единичном случае (при использовании Оксидата торфа на почве с низким уровнем плодородия) наблюдалось усиление антиоксидантной защиты клеток плодов на 16 % относительно контроля, тогда как внесение микробного стимулятора роста приводило, напротив, к ее ослаблению на 10–41 %, последовательно нараставшему по мере уменьшения его концентрации (табл. 3).

Таблица 2. **Активность окислительно-восстановительных ферментов в плодах *V. corymbosum* в вариантах полевых опытов с применением ростостимулирующих препаратов (в сухом веществе)**

Table 2. **Activity of redox enzymes in *V. corymbosum* fruits in field experiments using growth-promoting agents (in dry matter)**

Вариант опыта	Активность КАТ, мкмоль H_2O_2 / (г · мин)		Активность ПО, ед. опт. плотн. / (г · мин)		Активность ПФО, ед. опт. плотн. / (г · мин)		Активность СОД, отн. ед. / мг белка	
	$\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$	t	$\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$	t	$\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$	t	$\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$	t
Эксперимент на территории ЭБ								
Контроль	**12,97 ± 0,43**	–	**9,51 ± 0,41**	–	**985,9 ± 24,3**	–	**7,94 ± 0,02**	–
Оксидат торфа 0,4 %	15,65 ± 0,15	6,8*	7,05 ± 0,28	–5,4*	1 313,7 ± 7,5	12,9*	9,93 ± 0,01	82,7*
Экоберит 2 %	14,76 ± 0,11	4,9*	11,82 ± 0,13	6,1*	383,5 ± 5,8	–24,1*	4,39 ± 0,03	–91,4*
Экоберит 4 %	27,85 ± 0,82	16,5*	14,17 ± 0,28	10,1*	492,7 ± 29,2	–13,0*	4,36 ± 0,05	–63,8*
Экоберит 8 %	26,31 ± 1,03	12,2*	9,91 ± 0,28	0,9	585,4 ± 26,8	–11,1*	4,83 ± 0,01	–121,7*
Эксперимент на территории КФХ								
Контроль	**18,18 ± 0,52**	–	**5,41 ± 0,05**	–	**935,9 ± 13,8**	–	**9,85 ± 0,04**	–
Оксидат торфа 0,4 %	5,17 ± 1,53	–8,1*	11,58 ± 0,38	6,8*	767,1 ± 2,7	–12,0*	12,11 ± 0,15	14,7*
Экоберит 4 %	13,47 ± 0,39	–6,8*	9,71 ± 0,13	7,3*	582,3 ± 6,6	–23,1*	4,08 ± 0,04	–103,8*
Экоберит 8 %	5,62 ± 0,09	–23,5*	11,32 ± 0,12	7,8*	485,1 ± 6,9	–29,3*	4,27 ± 0,04	–103,7*

Таблица 3. **Относительные различия с контролем вариантов полевых опытов с применением ростостимулирующих препаратов по уровню энзимо-антиоксидантной активности плодов *V. corymbosum***

Table 3. **Relative differences from the control variants of field experiments using growth-stimulating drugs in the level of enzymatic-antioxidant activity of *V. corymbosum* fruits**

Показатель	Оксидат торфа, 0,4 %	Экоберит, 2 %	Экоберит, 4 %	Экоберит, 8 %
Эксперимент на территории ЭБ				
АОА (ДФПГ)	**+15,5**	-40,7	–23,5	–9,5
Активность КАТ	**+20,7**	**+13,8**	**+114,7**	**+102,9**
Активность ПО	**–25,9**	**+24,3**	**+49,0**	–
Активность ПФО	**+33,2**	–61,1	–50,0	–40,6
Активность СОД	**+25,1**	–44,7	–45,1	–39,2
Совокупный эффект	**+68,6**	–108,4	+45,1	+13,6
Эксперимент на территории КФХ				
АОА (ДФПГ)	–11,1	Не опр.	–33,3	–31,4
Активность КАТ	–71,6	–	–25,9	–69,1

Окончание табл. 2

Показатель	Оксидат торфа, 0,4 %	Экоберит, 2 %	Экоберит, 4 %	Экоберит, 8 %
Активность ПО	**+114,0**	–	**+79,5**	**+109,2**
Активность ПФО	–18,0	–	–37,8	–48,2
Активность СОД	**+22,9**	–	–58,6	–56,7
Совокупный эффект	**+36,2**	–	–76,1	–96,2

Примечание. Прочерк (–) означает отсутствие статистически значимых по *t*-критерию Стьюдента различий с контролем при $p < 0,05$.

В полевом опыте на более плодородной почве в КФХ в общих с предыдущим экспериментом вариантах с применением Экоберита отмечено более выраженное, чем в предыдущем случае, отставание от контроля по общему уровню АОА в пределах 31–33 % при отсутствии заметного влияния концентрации препарата на величину данного показателя. При этом, в отличие от эксперимента на менее плодородной почве, здесь выявлено также отставание от контроля по уровню АОА при использовании Оксидата торфа.

Что касается изменений активности отдельных защитных ферментов на фоне применения стимуляторов роста, то в их направленности и степени проявления установлены как сходные, так и противоположные закономерности, обусловленные преимущественно состоянием агрохимического фона. Так, в опыте на ЭБ во всех без исключения вариантах с применением ростостимулирующих препаратов показано усиление активности КАТ на 14–115 % по сравнению с контролем: минимальное – при использовании Оксидата торфа, а также 2%-го Экоберита, а максимальное – при применении 4%-го и в меньшей степени 8%-го раствора микробного препарата (табл. 3).

Заметим, что при внесении последнего активизация работы КАТ сопровождалась усилением по сравнению с контролем активности ПО на 24–49 % при одновременном ослаблении таковой ПФО и СОД – на 41–61 и 39–45 % соответственно. В варианте же с использованием Оксидата торфа наблюдалась противоположная картина, указывавшая на снижение активности ПО на 26 % при увеличении таковой ПФО и СОД на 33 и 25 %. Как видим, в ответной реакции ферментного комплекса плодов на применение стимуляторов роста проявился отчетливый синергизм в изменении активности КАТ и ПО на фоне противоположных изменений таковой ПФО и СОД. В первом случае это свидетельствовало о совместном участии КАТ и ПО в утилизации H_2O_2 и предотвращении развития окислительного стресса, тогда как синхронное ослабление активности СОД и ПФО, находящихся между собой здесь в прямой взаимосвязи, могло указывать на переключение метаболизма с активного синтеза органических соединений на процессы созревания плодов, что, скорее всего, являлось генетически детерминированной особенностью растений голубики, отмеченной нами также в более ранних исследованиях с использованием стимуляторов роста, причем степень проявления синергизма варьировалась в зависимости от химической природы последних [17].

Наблюдаемое же в наших исследованиях сопряженное снижение активности СОД, переводящей супероксид-радикал в пероксид водорода, и ПФО, разлагающей последний, и проявляющих при этом прямое взаимодействие, могло указывать на ослабление противостояния клеточных структур окислительному стрессу с усилением накопления продуктов перекисного окисления липидов. На наш взгляд, применение Экоберита явилось своеобразным «триггером», запускавшим механизм синергического взаимодействия ПФО и СОД, что в определенной мере сдерживало биосинтез биофлавоноидов, в том числе антоциановых пигментов [18], действующих как универсальный биохимический щит, обеспечивающий защиту тканей плода от оксидативного стресса путем нейтрализации свободных радикалов. Заметим, что и в работе В. А. Кузнецовой с соавт., посвященной исследованию антиоксидантных свойств семян сои амурской селекции у скороспелых сортов, также выявлена положительная корреляция между активностью ПФО и СОД [19].

Что же касается варианта опыта с применением Оксидата торфа, то в нем, напротив, наблюдалось сходное по величине сопряженное усиление активности КАТ, ПФО и СОД (в пределах

21–33 %) относительно контроля, свидетельствовавшее о синергизме их взаимодействия в антиоксидантной защите и сопровождавшееся сходным по выразительности ослаблением активности ПО (табл. 3). На наш взгляд, в данном случае совместное действие СОД и КАТ обусловлено дисмутирующим влиянием первого на супероксидный анион-радикал до перекиси водорода и ее последующим расщеплением вторым ферментом на воду и кислород, тогда как синхронное усиление активности КАТ и ПФО обусловлено необходимостью снижения уровня H_2O_2, предотвращающего повреждение тканей [20, 21]. Что же касается проявления на фоне внесения Оксидата торфа антагонизма в изменении активности КАТ и ПО, то объяснение этому следует искать в наиболее высоком в рамках эксперимента накоплении биофлавоноидов в плодах голубики, в том числе антоциановых пигментов [18], способствующем ингибированию ПО, генерирующей свободные радикалы в результате участия в разрушении последних, при одновременном стимулировании КАТ, действующей исключительно как защитный фермент, разлагающий перекись водорода [22].

В аналогичном эксперименте на КФХ, в отличие от предыдущего, в изменении активности КАТ во всех общих с ним вариантах с применением стимуляторов роста установлено, напротив, отставание от контроля на 26–72 %, наименьшее при внесении 4%-го раствора микробного препарата и наибольшее (причем практически одинаковое) – при применении Оксидата торфа и Экоберита 8%-й концентрации. Столь выразительное подавление активности данного фермента сопровождалось ингибированием ее у ПФО на 18–48 %, а при использовании микробного препарата – также активности СОД на 57–59 %, что согласовывалось с показанным в табл. 3 ослаблением защитных функций антиоксидантной системы плодов в целом при выраженном синергизме его проявления у обозначенных ферментов. Но, как и в эксперименте на менее плодородной почве, в данном опыте при использовании Оксидата торфа наблюдалось сходное с ним по величине усиление активности СОД по сравнению с контролем, что, очевидно, связано со специфическим действием данного препарата в стимуляции дополнительной защиты тканей плодов от окислительного стресса.

Вместе с тем, в отличие от эксперимента на менее плодородной почве, здесь на фоне более значительного снижения энзимо-антиоксидантной активности плодов при использовании стимуляторов роста имело место существенное усиление активности ПО по сравнению с контролем на 80–114 % (табл. 3), прямо коррелировавшее с содержанием в плодах биофлавоноидов, в том числе антоциановых пигментов [18]. Скорее всего, в данном случае при более высоком уровне агрохимического обеспечения растений происходила определенная перестройка в работе антиоксидантного комплекса плодов, в результате которой приоритетная роль в защите клеточных структур от окислительного стресса отводилась ПО. Несмотря на возможное участие последней в деструкции биофлавоноидов, логично предположить наличие противодействия ей со стороны других менее активных энзимов, поскольку параметры накопления Р-витаминов в плодах опытных растений оказались даже несколько выше, чем в эксперименте на менее плодородной почве [18].

Нетрудно убедиться, что в обоих экспериментах весьма отчетливо проявились выраженные в разной степени различия с контролем по исследуемым характеристикам антиоксидантного комплекса плодов голубики, что указывало на специфичность их ответа на применение стимуляторов роста в зависимости от эдафического фактора. На наш взгляд, для оценки их влияния на общую величину выявленных различий представлялось целесообразным для каждого варианта опыта произвести суммирование расхождений с контролем по всем исследуемым характеристикам энзимо-антиоксидантного комплекса плодов с учетом их знака.

Как следует из табл. 3, независимо от уровня плодородия почвы, наиболее эффективным агроприемом, обеспечившим максимальную защиту клеточных структур от окислительного стресса, следовало признать внесение в приствольную зону посадок голубики 0,4%-го раствора Оксидата торфа. При этом на почве с менее высоким уровнем плодородия использование 4%-го раствора Экоберита уступало лидирующему агроприему по эффективности в 1,5 раза и в 5 раз – при использовании его 8%-го раствора, тогда как применение 2%-го раствора препарата оказалось вовсе неэффективным. На почве с более высоким уровнем плодородия общий уровень антиоксидантной защиты при применении Оксидата торфа почти в 2 раза уступал таковому

на менее плодородной почве при абсолютном доминировании негативного влияния Экоберита на комплекс антирадикальных свойств плодов, наиболее выраженного на фоне применения его 8%-го раствора, и в 1,3 раза меньшей степени – при использовании 4%-го раствора.

Заключение. В результате сравнительного исследования в Южной агроклиматической зоне республики (Ганцевичский р-н Брестской обл.) в рамках двух полевых опытов с низким и высоким уровнем плодородия почвы влияния биологических препаратов ростостимулирующего действия – Оксидата торфа «Голубика» с микроэлементами в концентрации 0,4 % и нового микробного препарата Экоберит в концентрациях 2, 4 и 8 % на формирование энзимо-антиоксидантного комплекса плодов голубики высокорослой установлено, что уровень АОА, а также большинства окислительно-восстановительных ферментов определялся не только воздействием испытываемых агроприемов, но и уровнем плодородия почвы, и лишь для СОД ключевое значение в этом плане принадлежало первому фактору.

Независимо от состояния агрохимического фона, использование стимуляторов роста способствовало снижению общего уровня АОА, особенно на более плодородной почве. Показано, что на почве с низким уровнем плодородия в ответной реакции ферментного комплекса плодов на испытываемые агроприемы проявился отчетливый синергизм в изменении активности КАТ и ПО на фоне противоположных изменений активности ПФО и СОД. На более плодородной почве при использовании стимуляторов роста наблюдалось более выраженное, чем на менее плодородной, снижение активности КАТ, СОД и ПФО при существенном усилении активности ПО, прямо коррелировавшее с содержанием в плодах биофлавоноидов, в том числе антоциановых пигментов.

Установлено, что независимо от уровня плодородия почвы, наиболее эффективным агроприемом, обеспечившим максимальную защиту клеточных структур плодов от окислительного стресса, следовало признать внесение в приствольную зону посадок голубики 0,4%-го раствора Оксидата торфа. При этом на почве с низким уровнем плодородия использование 4%-го раствора Экоберита уступало лидирующему агроприему по эффективности в 1,5 раза, а при использовании 8%-го – в 5 раз при абсолютной неэффективности 2%-го раствора. На почве с более высоким уровнем плодородия общий уровень антиоксидантной защиты при применении Оксидата торфа почти вдвое уступал таковому на менее плодородной почве при абсолютном доминировании негативного влияния Экоберита на комплекс антирадикальных свойств плодов, наиболее выраженного на фоне применения его 8%-го раствора и уступавшего ему в 1,3 раза по данному признаку 4%-го раствора.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список использованных источников

1. Влияние биологических средств защиты и регуляции роста растений на питательную и витаминную ценность плодов голубики высокорослой / Ж. Рупасова, Ф. Привалов, Н. Павловский [и др.] // Наука и инновации. – 2025. – № 10. – С. 61–67.

2. Влияние биологических средств защиты и регуляции роста растений на биофлавоноидный комплекс плодов *Vaccinium corymbosum* L. (голубики высокорослой) в условиях Беларуси / Ж. А. Рупасова, Н. Б. Павловский, Ф. И. Привалов [и др.] // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2025. – Т. 69, № 2. – С. 137–143.

3. Влияние биологических препаратов рострегулирующего действия на содержание органических кислот, углеводов и танинов в плодах голубики высокорослой в зависимости от уровня плодородия почвы / Ж. А. Рупасова, Э. И. Коломиец, М. Н. Мандрик-Литвинкович [и др.] // Микробные биотехнологии: фундаментальные и прикладные аспекты: сб. науч. тр. / НАН Беларуси, Ин-т микробиологии [и др.]; редкол.: А. И. Зинченко (гл. ред.) [и др.]. – Мн., 2025. – Т. 17. – С. 176–192.

4. Влияние эдафического фактора на биофлавоноидный комплекс плодов голубики высокорослой на фоне применения биологических препаратов фунгицидного и рострегулирующего действия / Ж. А. Рупасова, Ф. И. Привалов, Н. Б. Павловский [и др.] // Микробные биотехнологии: фундаментальные и прикладные аспекты: сб. науч. тр. / НАН Беларуси, Ин-т микробиологии [и др.]; редкол.: А. И. Зинченко (гл. ред.) [и др.]. – Мн., 2025. – Т. 17. – С. 193–210.

5. Влияние эдафического фактора на содержание органических кислот, углеводов и танинов в плодах *Vaccinium corymbosum* L. при применении биологических регуляторов роста / Ж. А. Рупасова, Э. И. Коломиец, Т. А. Пилипчук [и др.] // Ботанический сад. – 2025. – № 4 (8). – С. 26–30.

6. 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. – Мн., 2017. – Вып. 46. – С. 190–199.

7. Dung, N. T. Chimical composition, antimicrobical and antioxidant activites of the essential oil and the ethanol extract of *Cleistocalux 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

8. Чупахина, Г. Н. Физиологические и биохимические методы анализа растений: практикум / авт.-сост. Г. Н. Чупахина. – Калининград: Калинингр. гос. ун-т, 2000. – 59 с.

9. 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. Мосталыгина. – Курган: [б. и.], 2016. – 30 с.

10. 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.

11. Misra, Y. P. The univalent reduction of oxygen by reduced flevins and quinines / Y. P. Misra, I. Fridovich // Journal of Biological Chemistry. – 1972. – Vol. 247, N 1. – P. 188–192.

12. Теория вероятностей и математическая статистика. Математические модели: учеб. пособие для студентов высш. учеб. заведений / В. Д. Мятлев, Л. А. Панченко, Г. Ю. Ризниченко, А. Т. Терехин. – М.: Изд. центр «Академия», 2009. – 320 с.

13. Полифенолоксидазная и пероксидазная активность дерново-подзолистых почв в условиях воздействия выбросов предприятия по производству строительных материалов / Е. А. Самусик, Т. П. Марчик, С. Е. Головатый // Журнал Белорусского государственного университета. Экология. – 2019. – № 3. – С. 65–79.

14. Дырин, В. А. Активность пероксидазы и полифенолоксидазы в торфе целинного и рекультивируемого участков болотной экосистемы низинного типа / В. А. Дырин // Вестник Томского государственного педагогического университета. – 2015. – Вып. 2. – С. 164–170.

15. Курамшина, З. М. Повышение толерантности *Triticum aestivum* к кадмий-стрессу с помощью эндофитных штаммов *Bacillus subtilis* / З. М. Курамшина, Ю. В. Смирнова, Р. М. Хайруллин // Физиология растений. – 2016. – Т. 63, № 5. – С. 679–687.

16. 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.

17. Генотипические особенности ответной реакции антиоксидантного комплекса плодов голубики (*Vaccinium corymbosum* L.) на применение минеральных и органических удобрений на выработанном торфянике низинного типа / Ж. А. Рупасова, А. П. Яковлев, И. В. Савосько [и др.] // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя біялагічных навук. – 2022. – Т. 67, № 1. – С. 24–32.

18. Влияние плодородия почвы на биофлавоноидный комплекс плодов *Vaccinium corymbosum* L. при применении биологических регуляторов роста / Ж. А. Рупасова, Ф. И. Привалов, Э. И. Коломиец [и др.] // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя біялагічных навук. – 2026. – Т. 71, № 2. – С. 95–103.

19. Активность супероксиддисмутазы и полифенолоксидазы семян районированных сортов сои амурской селекции / В. А. Кузнецова, А. А. Блинова, Л. Е. Иваченко [и др.] // Таврический вестник аграрной науки. – 2019. – № 3. – С. 86–93.

20. The effects of ultrasonication on the phytochemicals, antioxidant, and polyphenol oxidase and peroxidase activities in coffee leaves / D. Ji, Q. Wang, T. Lu [et al.] // Food Chemistry. – 2021. – Vol. 373, Pt. B. – Art. 131480. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131480

21. Flat dual-frequency sweeping ultrasound enhances the inactivation of polyphenol oxidase in strawberry juice / B. Xu, J. Chen, S. M. R. Azam [et al.] // Journal of Food Measurement and Characterization. – 2021. – Vol. 16, N 1. – P. 762–771. https://doi.org/10.1007/s11694-021-01202-3

22. Колупаев, Ю. Е. Активные формы кислорода, антиоксиданты и устойчивость растений к действию стрессоров / Ю. Е. Колупаев, Ю. В. Карпец. – Киев: Логос, 2019. – 277 с.

References

1. Rupasova Zh., Privalov F., Pavlovskii N., Kolomiets E., Pilipchuk T. The influence of biological plant protection and growth regulation on the nutritional and vitamin value of highbush blueberry fruits. *Nauka i innovatsii* [Science and Innovations], 2025, no. 10, pp. 61–67 (in Russian).

2. Rupasova Zh. A., Pavlovskii N. B., Privalov F. I., Mandrik-Litvinkovich M. N., Kolomiets E. I. The effect of biopreparation for plant protection and growth regulation on bioflavonoid complex of *Vaccinium corymbosum* L. (highbush blueberry) in the conditions of Belarus. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Reports of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2025, vol. 69, no. 2, pp. 137–143 (in Russian).

3. Rupasova Zh. A., Kolomiets E. I., Mandrik-Litvinkovich M. N., Pavlovskii N. B., Aleshchenkova Z. M., Sayan A. A., Ushakova A. V., Avramenko S. N., Belyi P. N., Drozd O. V. The effect of biological growth-regulating drugs on the content of organic acids, carbohydrates and tannins in the fruits of tall blueberries, depending on the level of soil fertility. *Mikrobnye biotekhnologii: fundamental'nye i prikladnye aspekty: sbornik nauchnykh trudov* [Microbial biotechnology: fundamental and applied aspects: a collection of scientific papers]. Minsk, 2025, vol. 17, pp. 176–192 (in Russian).

4. Rupasova Zh. A., Privalov F. I., Pavlovskii N. B., Sayan A. A., Avramenko S. N., Ushakova A. V., Shpital'naya T. V., Kolomiets E. I., Mandrik-Litvinkovich M. N., Aleshchenkova Z. M. The effect of the edaphic factor on the bioflavonoid complex of tall blueberry fruits against the background of the use of biological preparations with fungicidal and growth-

regulating effects. *Mikrobnye biotekhnologii: fundamental'nye i prikladnye aspekty: sbornik nauchnykh trudov* [Microbial biotechnology: fundamental and applied aspects: a collection of scientific papers]. Minsk, 2025, vol. 17, pp. 193–210 (in Russian).

5. Rupasova Zh. A., Kolomiets E. I., Pilipchuk T. A., Aleshchenkova Z. M., Ushakova A. V., Sayan A. S., Pavlovskii N. B., Drozd O. V., Vashkevich M. N., Belyi P. N., Vecher N. N. Influence of the edaphic factor on the content of organic acids, carbohydrates and tannins in the fruits of *Vaccinium corymbosum* L. with the use of biological growth regulators. *Botanicheskii sad* [Botanical Garden], 2025, no. 4 (8), pp. 26–30 (in Russian).

6. 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).

7. Dung N. T., Kim J. M., Kang S. C. Chimical composition, antimicrobical and antioxidant activites of the essential oil and the ethanol extract of *Cleistocalux 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

8. Chupakhina G. N. *Physiological and biochemical methods of plant analysis.* Kaliningrad: Kaliningrad state University, 2000. 59 p. (in Russian).

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

10. Voskresenskaya O. L., Alyabysheva E. A., Polovnikova M. G. *Large practical course on bioecology.* Yoshkar-Ola, Mari State University, 2006, pt. 1. 107 p. (in Russian).

11. Misra Y. P., Fridovich, I. The univalent reduction of oxygen by reduced flevins and quinines. Journal of Biological Chemistry, 1972, vol. 247, no. 1, pp. 188–192.

12. Myatlev V. D., Panchenko L. A., Riznichenko G. Yu., Terekhin A. T. *Probability Theory and Mathematical Statistics. Mathematical Models*. Moscow, Publishing Center "Academy", 2009. 320 p. (in Russian).

13. Samusik E. A., Marchik T. P., Golovatyi S. E. Polyphenol oxidase and peroxidase activity of sod-podzolic soils under the impact of the emissions of a plant producing construction materials. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekologiya = Journal of the Belarusian State University. Ecology*, 2019, no. 3, pp. 65–79 (in Russian).

14. Dyrin V. A. Peroxidase and polyphenoloxidase activity in peat of virgin and reclaimed areas of a lowland bog. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta = Tomsk State Pedagogical University Bulletin*, 2015, iss. 2, pp. 164–170 (in Russian).

15. Kuramshina Z. M., Smirnova Y. V., Khairullin R. M. Increasing Triticum aestivum tolerance to cadmium stress through endophytic strains of Bacillus subtilis. *Russian Journal of Plant Physiology,* vol. 63, no. 5, pp. 636–644. https://doi.org/10.1134/S1021443716050083

16. 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).

17. Rupasova Zh. A., Yakovlev A. P., Savos'ko I. V., Belyi P. N., Domash V. I., Azizbekyan S. G., Lishtvan I. I., Goncharova L. V. Genotypic features of the response of the antioxidant complex of blueberry fruits to the use of mineral and organic fertilizers on an exhausted lowland peatland. *Vestsi Natsyyanal'nay akademii navuk Belarusi. Seryya biyalagichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological Series*, 2022, vol. 67, no. 1, pp. 24–32 (in Russian).

18. Rupasova Zh. A., Privalov F. I., Kolomiets E. I., Avramenko S. N., Pavlovskii N. B. The influence of soil fertility on the bioflavonoid complex of *Vaccinium corymbosum* L. fruits with the use of biological growth regulators. *Vestsi Natsyyanal'nay akademii navuk Belarusi. Seryya biyalagichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological Series*, 2026, vol. 71, no. 2, pp. 95–103 (in Russian).

19. Kuznetsova V. A., Blinova A. A., Ivachenko L. E., Fesenko E. M., Fokina Yu. V. Superoxide dismutases and polyphenoloxidases activity in the seeds of zoned varieties of soybean of the amur breeding. *Tavricheskii vestnik agrarnoi nauki* [Tavricheskiy Bulletin of Agrarian Science], 2019, no. 3, pp. 86–93 (in Russian).

20. Ji D., Wang Q., Lu T., Ma H., Chen X. The effects of ultrasonication on the phytochemicals, antioxidant, and polyphenol oxidase and peroxidase activities in coffee leaves. *Food Chemistry*, 2021, vol. 373, pt. B, art. 131480. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131480

21. Xu B., Chen J., Azam S. M. R., Feng M., Wei B., Yan W., Zhou C., Ma H., Bhandari B., Ren G., Duan X. Flat dual-frequency sweeping ultrasound enhances the inactivation of polyphenol oxidase in strawberry juice. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2021, vol. 16, no. 1, pp. 762–771. https://doi.org/10.1007/s11694-021-01202-3

22. Kolupaev Yu. E., Karpets Yu. V. *Reactive oxygen species, antioxidants and plant resistance to stressors*. Kyiv, Logos Publ., 2019. 277 p. (in Russian).

Информация об авторах

Рупасова Жанна Александровна – член-корреспондент, д-р биол. наук, профессор, гл. науч. сотрудник. Институт экспериментальной ботаники им. В. Ф. Купревича НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220012, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: J.Rupasova@cbg.org.by

Коломиец Эмилия Ивановна – академик, д-р биол. наук, профессор, генеральный директор. ГНПО «Химический синтез и биотехнологии» (ул. Академика Купревича, 2, пом. 7, 220084, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: kolomiets@biotech.bas-net.by

Павловский Николай Болеславович – канд. биол. наук, доцент, заведующий лабораторией. Центральный ботанический сад НАН Беларуси (ул. Сурганова, 2в, 220012, г. Минск, Республика Беларусь) E-mail: pavlovskiyn62@gmail.com

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

Алещенкова Зинаида Михайловна – д-р биол. наук, профессор, гл. науч. сотрудник. Институт микробиологии НАН Беларуси (ул. Академика Купревича, 2, 220084, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: zaleschenkova@gmail.com. https://orcid.org/0009-0006-8620-4427

Information about the authors

Zhanna A. Rupasova – Corresponding Member, D. Sc. (Biol.), Professor, Chief Researcher. V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: J.Rupasova@cbg.org.by

Emilia I. Kolomiets – Academician, D. Sc. (Biol.), Professor, State Research and Production Association “Chemical Synthesis and Biotechnology” (2, office 7, Akademika Kuprevicha Str., 220084, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kolomiets@biotech.bas-net.by

Nikolai B. Pavlovsky – Ph. D. (Biol.), Associate Professor, Head of the Laboratory. Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus (2v, Surganov Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: pavlovskiyn62@gmail.com

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

Zinaida M. Aleschenkova – D. Sc. (Biol.), Professor, Chief Researcher. Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus (2, Akademika Kuprevicha Str., 220084, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: zaleschenkova@gmail.com. https://orcid.org/0009-0006-8620-4427

ISSN 1029-8940 (Print)
ISSN 2524-230X (Online)
УДК 575.73:633.11
https://doi.org/10.29235/1029-8940-2026-71-4-282-291

Поступила в редакцию 07.04.2026
Received 07.04.2026

О. А. Орловская, К. К. Яцевич, Л. В. Милько, А. В. Кильчевский

Институт генетики и цитологии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

АНАЛИЗ ГЕНОВ, АССОЦИИРОВАННЫХ С МАССОЙ ТЫСЯЧИ ЗЕРЕН, У ЛИНИЙ МЯГКОЙ ПШЕНИЦЫ С ИНТРОГРЕССИЯМИ ЧУЖЕРОДНОГО ГЕНЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

Аннотация. Из всех компонентов урожайности пшеницы (*Triticum aestivum* L.) особенно большое значение имеет масса 1 000 зерен (Thousand Grain Weight, TGW) как наиболее стабильный признак с высокой наследуемостью. Масса зерна определяется главным образом его размером (длиной и шириной). В данном исследовании в коллекции 40 линий мягкой пшеницы с интрогрессией генетического материала видов рода *Triticum* и 15 родительских генотипов изучен полиморфизм генов *TaGW2-6A*, *TaGW2-6B*, *TaTGW6-A1*, *TaGs3-4A*, *TaGs5-3A*, *TaGs3-D1*, *TaGASR7-A1*, *TaCKX6-D1*, *TaD11-2A*, *TaCYP78A5*, участвующих в формировании размера зерновки, для выявления их связи с массой зерна, а также оценена возможность сочетания высокой TGW и качества зерна у линий пшеницы с чужеродным генетическим материалом. Установлено, что данные гены оказывают значимый вклад в изменчивость изученных признаков, за исключением генов *TaGW2-6A* и *TaD11-2A*, для которых не выявлена роль в формировании морфометрических показателей и TGW соответственно. Во всей коллекции доля благоприятных гаплотипов/аллелей большинства генов была на высоком уровне (60,0–100,0 %). У генотипов с высокой TGW чаще всего отмечено следующее сочетание гаплотипов: *TaGS3-D1a*, *H1c*, *Hap-6A-G*, *Hap-6B-2*, *TaD11-2A-HapI* и *Ap-HapII*.

В среднем за двухлетний период у интрогрессивных линий длина зерновки была значимо выше, а ширина – значимо ниже, чем у сортов; TGW была больше, чем у родительских форм, но статистически значимо – только по сравнению с сородичами мягкой пшеницы. 19 интрогрессивных линий из 40 исследованных достоверно превышали исходный сорт по TGW, при этом 11 из них также характеризовались высокими показателями по содержанию белка и клейковины в зерне, что указывает на возможность создания линий с включением чужеродного генетического материала, сочетающих высокую массу и качество зерна.

Ключевые слова: мягкая пшеница, сородичи пшеницы, интрогрессивные линии пшеницы, гены, регулирующие размер зерна, масса тысячи зерен

Для цитирования: Анализ генов, ассоциированных с массой тысячи зерен, у линий мягкой пшеницы с интрогрессиями чужеродного генетического материала / О. А. Орловская, К. К. Яцевич, Л. В. Милько, А. В. Кильчевский // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя біялагічных навук. – 2026. – Т. 71, № 4. – С. 282–291. https://doi.org/10.29235/1029-8940-2026-71-4-282-291

Olga A. Orlovskaya, Kanstantsyia K. Yatsevich, Larisa V. Milko, Alexander V. Kilchevsky

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

ANALYSIS OF GENES ASSOCIATED WITH THOUSAND GRAIN WEIGHT IN COMMON WHEAT LINES WITH ALIEN GENETIC MATERIAL INTROGRESSIONS

Abstract. Among all yield components of wheat (*Triticum aestivum* L.), thousand grain weight (TGW) is especially important as the most stable trait with high heritability. Grain weight is mainly determined by its size (length and width). Polymorphism of *TaGW2-6A*, *TaGW2-6B*, *TaTGW6-A1*, *TaGS3-4A*, *TaGS5-3A*, *TaGS3-D1*, *TaGASR7-A1*, *TaCKX6-D1*, *TaD11-2A*, and *TaCYP78A5* genes, involved in the regulation of grain size, was analyzed in the collection of 40 common wheat lines with introgressions of *Triticum* species genetic material and 15 parental genotypes. The aim was to identify the association of allelic variants of these genes with grain weight and to assess the potential for combining high TGW with grain quality in wheat lines with alien genetic material. It was established that these genes significantly contribute to the variability of the studied traits, except for *TaGW2-6A* and *TaD11-2A*, for which no role was identified in the formation of morphometric parameters and TGW, respectively. The favorable haplotypes/alleles frequency for most genes was high (60.0–100.0 %) across the collection. Haplotype combination *TaGS3-D1a*, *H1c*, *Hap-6A-G*, *Hap-6B-2*, *TaD11-2A-HapI*, and *Ap-HapII* was most frequent in genotypes with high TGW.

On average over the two-year study period, introgression lines exhibited significantly greater grain length but significantly lower grain width compared to varieties; TGW was higher than in the parental forms, but statistically significant superiority was noted only in comparison with common wheat relatives. Among the studied 40 introgression lines, 19 significantly surpassed the original variety in TGW, with 11 of these also demonstrating high grain protein and gluten content. The results

indicate the possibility of obtaining wheat lines with alien genetic material combining high grain weight with improved grain quality.

Keywords: common wheat, wheat relatives, wheat introgression lines, genes regulating grain size, thousand grain weight

For citation: Orlovskaya O. A., Yatsevich K. K., Milko L. V., Kilchevsky A. V. Analysis of genes associated with thousand grain weight in common wheat lines with alien genetic material introgressions. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya biyalagichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological series*, 2026, vol. 71, no. 4, pp. 282–291 (in Russian). https://doi.org/10.29235/1029-8940-2026-71-4-282-291

Введение. Чтобы обеспечить зерном постоянно растущее население планеты, производство пшеницы в мире должно увеличиться на 40,0 % к 2030 г. [1]. Известно, что сородичи мягкой пшеницы используются для улучшения генофонда культивируемых сортов (*Triticum aestivum* L.), так как обладают рядом хозяйственно полезных признаков [2]. Нами созданы линии пшеницы с включением генетического материала *T. dicoccoides* (Körn. ex Aschers. et Graebn.) Schweinf., *T. dicoccum* Schrank ex Schuebl., *T. durum* Desf., *T. spelta* L., *T. kiharae* Dorof. et Migusch. и выявлен положительный эффект чужеродного генетического материала на питательную ценность зерна [3]. Отрицательная зависимость между качеством зерна и продуктивностью наряду с участием множества генов в регуляции данных признаков существенно усложняет одновременное улучшение урожайности и качества зерна пшеницы [4]. В связи с этим представляет интерес оценка влияния чужеродного генетического материала на показатели продуктивности пшеницы у интрогрессивных линий.

Из всех компонентов урожайности пшеницы особенно большое значение имеет масса 1 000 зерен (Thousand Grain Weight, TGW) как наиболее стабильный признак с высокой наследуемостью [5]. Масса зерна определяется главным образом его размером (длиной и шириной). Гены, контролирующие размер и массу зерна, подробно исследованы у риса. Идентифицировано несколько важных сигнальных путей и компонентов, связанных с данными признаками [6]. Например, ген *GW2*, который кодирует убиквитинлигазу E3, регулирует ширину зерна и TGW, ограничивая деление клеток. *GS2* кодирует фактор транскрипции и влияет на размер зерен, способствуя росту и пролиферации клеток. Молекулярное клонирование генов пшеницы затруднено из-за сложного генома данной культуры, однако с появлением более качественных эталонных геномов мягкой пшеницы и ее сородичей эффективность клонирования повысилась и за последнее десятилетие был клонирован ряд генов, связанных с увеличением TGW пшеницы, которые являются ортологами генов риса [5]. В результате генетического анализа популяции рекомбинантных инбредных линий F_6, полученной от скрещивания сортов пшеницы с мелкими и крупными зернами, выявлено 5 стабильных локусов количественных признаков (Quantitative Trait Loci, QTL), ассоциированных с TGW, причем большинство из них совпадали по локализации с QTL, связанными с длиной и/или шириной зерна, что подтверждает тесную связь между морфометрическими показателями и массой зерна [7]. Установлено, что многие гены-кандидаты связаны с метаболизмом и транспортом фитогормонов (например, цитокинина, гиббереллина, ауксина, брассиностероида и этилена), а таже углеводов и белков зерна; участвуют в контроле роста и деления клеток [8]. Ранее в коллекции 40 линий мягкой пшеницы с генетическим материалом *T. dicoccoides*, *T. dicoccum*, *T. durum*, *T. spelta*, *T. kiharae* и их родительских форм нами были проанализированы гены, играющие важную роль в синтезе крахмала (*TaSus2-2A*, *TaSus2-2B*, *TaSus1-7A*, *TaSus1-7B*, *TaCWI-4A*, *TaCWI-5D*, *TaAGP-S1-7A*, *TaAGP-L-1B*, *TaBT1-6B*), ассоциированные с признаками «продуктивная кустистость», «число зерен с колоса» и «масса 1 000 зерен» [9].

Целью данного исследования является изучение генов *TaGW2-6A*, *TaGW2-6B*, *TaTGW6-A1*, *TaGs3-4A*, *TaGs5-3A*, *TaGs3-D1*, *TaGASR7-A1*, *TaCKX6-D1*, *TaD11-2A*, *TaCYP78A5*, участвующих в формировании размера зерновки пшеницы, для выявления их связи с массой зерна в коллекции интрогрессивных линий пшеницы и их родительских форм, а также оценка возможности сочетания высокой TGW и качества зерна у линий пшеницы с чужеродным генетическим материалом.

Материалы и методы исследования. Изучали 40 линий яровой мягкой пшеницы с интрогрессией генетического материала тетраплоидных (*T. dicoccoides*, *T. dicoccum*, *T. durum*) и гексаплоидных (*T. spelta*, *T. kiharae*) видов рода *Triticum* и 15 родительских форм (10 сортов *T. aestivum* L.

и 5 образцов сородичей мягкой пшеницы). Образцы сородичей пшеницы получены из коллекции ВИР. Растения выращивали на экспериментальных полях Института генетики и цитологии НАН Беларуси (г. Минск) в 2022–2023 гг. на дерново-подзолистой супесчаной почве. В течение двух вегетационных сезонов учитывали морфометрические показатели (длину и ширину зерна), TGW, общее содержание белка и клейковины в зерне, качество клейковины.

Для выделения ДНК из проростков пшеницы использовали набор реагентов «АртДНК» (АртБиоТех, Республика Беларусь) согласно протоколу производителя. Концентрацию ДНК определяли на спектрофотометре NanoDrop 8000 (Thermo Fisher Scientific, США). Идентификацию полиморфных вариантов гена *TaGW2-6A* проводили при помощи методик, предложенных в работах [10, 11], *TaGW2-6B* – в работе [12], *TaGS3-4A* – [13], *TaGs5-3A* – [14], *TaD11-2A* – [15], *TaCYP78A5* – [16]. Полиморфизмы генов *TaTGW6-A1*, *TaGASR7-A1*, *TaGs3-D1*, *TaCKX-D1* определяли с использованием технологии конкурентной аллель-специфической ПЦР (Kompetitive Allele Specific PCR, KASP) [17].

Общее содержание белка и клейковины в зерне, качество клейковины определяли на инфракрасном анализаторе «Инфра ЛЮМ ФТ-12» (Люмэкс, Россия). Для оценки качества клейковины использовали индекс деформации клейковины (ИДК). Согласно значениям этого показателя выделяли сильную клейковину (45–77 усл. ед., I группа качества), удовлетворительно слабую (78–102 усл. ед., II группа качества) и неудовлетворительно слабую (более 102 усл. ед., III группа качества).

Результаты эксперимента обобщены с применением методов описательной статистики и дисперсионного анализа в программных пакетах Statistica 10.0 (StatSoft, США).

Результаты и их обсуждение. Установлено достоверное влияние генотипа, условий года выращивания и их взаимодействия на формирование изученных признаков ($p < 0{,}001$). Исследование нашей коллекции показало, что сорта значимо уступали родственным видам по длине зерна, но превосходили их по ширине в оба года исследования. Самая высокая длина зерна отмечена у образца *T. kiharae* (0,82 см), который среди сородичей *T. aestivum* характеризовался одним из самых высоких значений и по ширине зерна (0,29 см), уступая только *T. spelta* к-1731 (0,31 см). Благодаря крупному размеру зерен *T. kiharae* и *T. spelta* к-1731 обладали и высокими показателями по TGW – 44,55 и 42,68 г соответственно. По данному признаку они превышали не только других сородичей пшеницы (36,65–39,39 г), но и большинство сортов (36,13–47,96 г). Сорта мягкой пшеницы и виды рода *Triticum* достоверно не различались по TGW. Интрогрессивные линии по изученным признакам были ближе к сортам, при этом длина зерновки была значимо выше, а ширина – значимо ниже (табл. 1).

Таблица 1. **Значения показателей размера и массы зерен в группах генотипов пшеницы в среднем за два года (X ± SEM)**

Table 1. **Mean values of grain size and weight traits in the groups of wheat genotypes for two-year period (X ± SEM)**

Признак	Сорта	Сородичи пшеницы	Интрогрессивные линии
Длина зерновки, см	0,62 ± 0,002	0,79 ± 0,004*	0,63 ± 0,001*
Ширина зерновки, см	0,32 ± 0,001	0,28 ± 0,002*	0,31 ± 0,0007*
Масса 1 000 зерен, г	41,24 ± 0,29	40,21 ± 0,31	41,88 ± 0,16

Примечание. Здесь и в табл. 2 X – средние значения признаков, SEM – стандартная ошибка среднего; * – статистически значимые различия по сравнению с группой «Сорта» при $p < 0{,}05$.

В среднем за два года в группе интрогрессивных линий TGW составила 41,88 г и была достоверно выше, чем в группе родственных видов (40,21 г), но статистически не отличалась от показателя в группе сортов (41,24 г). При этом 19 из 40 интрогрессивных линий значимо превышали родительский сорт по TGW. Самые высокие значения по данному показателю отмечены для линий, созданных с участием *T. durum* (195-3 (54,88 г), 196-1 (47,01 г), 226-7 (45,69 г)) и *T. kiharae* (25-2 (48,0 г) и 19 (46,72 г)).

Нами оценена возможность сочетания высокой TGW и качества зерна (содержание белка и сырой клейковины в зерне, качество клейковины) у генотипов пшеницы с интрогрессией

чужеродного генетического материала. Для селекции пшеницы такие генотипы представляют большую ценность, так как между содержанием белка в зерне и продуктивностью часто существует отрицательная корреляция [4]. В табл. 2 представлены данные для 11 интрогрессивных линий, превосходящих родительские сорта по комплексу хозяйственно ценных признаков. Все интрогрессивные линии достоверно превышали родительские сорта по TGW, а подавляющее их большинство также превосходило их по содержанию белка и клейковины в зерне. По качеству клейковины значимых различий между линиями и исходными сортами не обнаружено: индекс деформации клейковины находился в диапазоне 85,75–91,50 усл. ед., что соответствует II группе качества.

Таблица 2. **Значения основных показателей качества зерна и массы 1 000 зерен у генотипов пшеницы в среднем за два года (X ± SEM)**

Table 2. **Mean values of the main grain quality indicators and thousand-grain weight of wheat genotypes for two-year period (X ± SEM)**

Генотип	Линия	Масса 1 000 зерен, г	Содержание белка в зерне, %	Содержание клейковины в зерне, %	Группа качества клейковины
Саратовская 29		43,43 ± 0,84	16,78 ± 0,04	31,50 ± 0,20	II
Фестивальная		36,13 ± 0,37	20,10 ± 0,43	36,30 ± 1,41	II
Chinese Spring		39,88 ± 0,73	16,65 ± 0,17	28,93 ± 0,76	II
Белорусская 80		39,49 ± 0,66	16,73 ± 0,18	29,50 ± 0,15	II
T. kiharae × Саратовская 29	19	46,72 ± 0,80*	19,95 ± 0,20*	36,93 ± 1,57*	II
	25-2	48,00 ± 1,54*	18,58 ± 0,70*	34,15 ± 1,53*	II
T. kiharae × Фестивальная	28	39,40 ± 0,52*	19,53 ± 0,04	35,30 ± 1,24	II
	34-1	38,43 ± 1,58*	20,00 ± 0,75	37,40 ± 2,08	II
T. dicoccoides × Фестивальная	15-7-1	41,06 ± 0,75*	19,08 ± 0,27	34,25 ± 1,73	II
Chinese Spring × *T. durum*	184-1/6	42,63 ± 0,93*	19,53 ± 0,56*	37,45 ± 1,79*	II
T. durum × Chinese Spring	190-4/1	42,50 ± 0,68*	19,20 ± 0,31*	36,70 ± 1,24*	II
	195-3	54,88 ± 0,71*	18,83 ± 0,26*	37,60 ± 0,58*	II
	196-1	47,01 ± 0,62*	17,03 ± 0,27*	32,45 ± 0,58*	II
T. durum × Белорусская 80	221-1	43,76 ± 0,83*	17,55 ± 0,15	33,68 ± 0,71*	II
	226-7	45,69 ± 0,41*	18,45 ± 0,17*	35,30 ± 0,14*	II

Примечание. * – статистически значимо превышает родительский сорт при $p < 0,05$.

Гены пшеницы, которые участвуют в контроле роста и деления клеток и тем самым влияют на размер зерна, часто ассоциированы с одним из основных параметров урожайности – TGW. Одним из первых среди таковых был изучен ген *TaGW2*. В промоторных областях гомеологичных генов *TaGW2-6A* и *TaGW2-6B*, расположенных на хромосомах 6A и 6B, обнаружено 8 и 11 однонуклеотидных замен (SNP) соответственно, ассоциированных с шириной и массой зерна. На основе данных SNP выделено 2 гаплотипа *TaGW2-6A* (*Hap-6A-A* и *Hap-6A-G*) [10] и 4 гаплотипа *TaGW2-6B* (*Hap-6B-1*, *Hap-6B-2*, *Hap-6B-3*, *Hap-6B-4*) [12]. В исследованиях зарубежных ученых встречаются различные сведения об ассоциации гаплотипов гена *TaGW2-A1* с признаками продуктивности. Так, в работе Z. Su et al., 2011 [18] выявлена связь *Hap-6A-A* с высокой массой и шириной зерна; а в исследовании X. Zhang et al., 2013 [10] в качестве благоприятного гаплотипа выступал *Hap-6A-G*, поэтому оба аллеля принято считать благоприятными. В нашей коллекции подавляющее большинство генотипов (80,0 %) имели гаплотип *Hap-6A-G*, для которого показано статистически значимое превосходство по ширине зерна по сравнению с гаплотипом *Hap-6A-A*, при этом связи указанных гаплотипов с TGW нами не выявлено (табл. 3), что согласуется с данными других исследователей. Например, при изучении коллекции CIMMYT гаплотип *Hap-6A-G* встречался с более высокой частотой, чем *Hap-6A-A*, а ассоциация их с TGW также не обнаружена [5].

В гене *TaGW2-6A* полиморфные варианты идентифицированы не только в промоторе, но и в кодирующей области. В частности, в восьмом экзоне выявлена вставка основания T в положении 977 п. н., которая приводит к образованию усеченного белка (328 аминокислот вместо 424) и увеличению массы зерна [11]. Мутантный аллель *TaGW2-6A* нами обнаружен только

Таблица 3. **Сравнение средних значений признаков размера и массы зерна в группах генотипов пшеницы с различными гаплотипами/аллелями генов, участвующих в контроле роста и деления клеток**

Table 3. **Comparison of mean grain size and weight traits in the groups of wheat genotypes with different haplotypes/alleles of genes controlling cell growth and division**

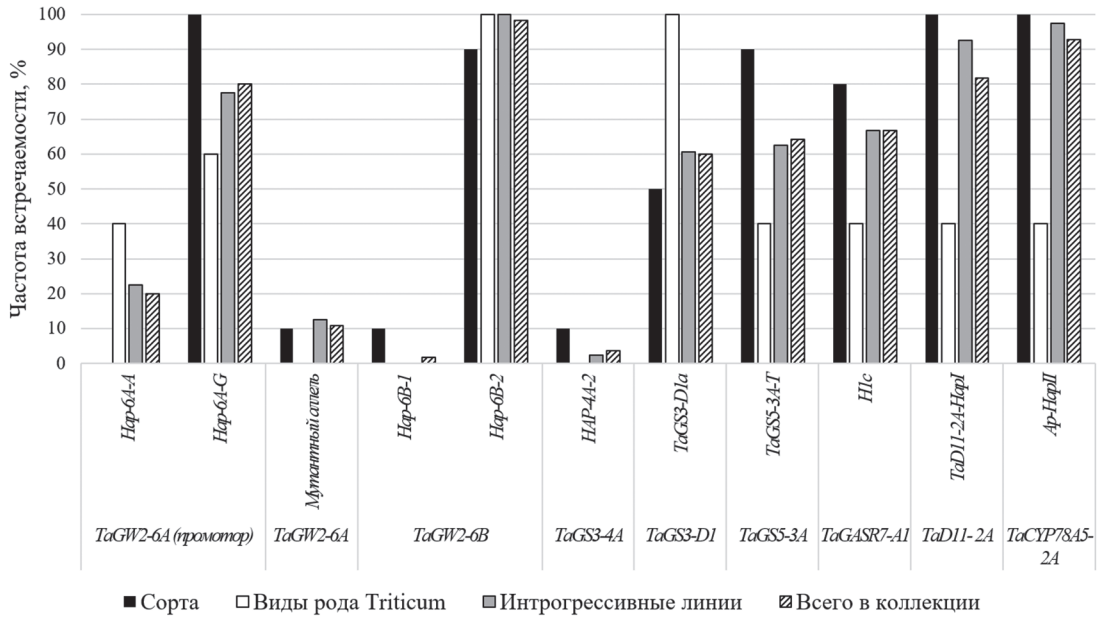
Генотип	Масса 1 000 зерен, г	Длина зерновки, см	Ширина зерновки, см
TaGW2-6A (промотор)			
Hap-6A-G	41,58 ± 0,15	0,637 ± 0,001	0,312 ± 0,0006
Hap-6A-A	41,73 ± 0,23	0,661 ± 0,003	0,304 ± 0,001
p	0,64	**0,000**	**0,000**
TaGW2-6A (восьмой экзон)			
Дикий аллель	41,40 ± 0,13	0,642 ± 0,001	0,310 ± 0,0007
Мутантный аллель	43,37 ± 0,46	0,645 ± 0,004	0,310 ± 0,002
p	**0,000002**	0,42	0,87
TaGS3-4A			
HAP-4A-2	43,08 ± 0,54	0,656 ± 0,004	0,314 ± 0,002
HAP-4A-3	40,88 ± 0,18	0,648 ± 0,002	0,305 ± 0,0009
HAP-4A-5	42,51 ± 0,19	0,631 ± 0,002	0,317 ± 0,0009
p	**0,000**	**0,000**	**0,000**
TaGS3-D1			
TaGS3-D1a	42,74 ± 0,16	0,646 ± 0,002	0,314 ± 0,0008
TaGS3-D1b	40,26 ± 0,20	0,637 ± 0,002	0,305 ± 0,001
p	**0,000**	**0,000**	**0,0002**
TaGS5-3A			
TaGS5-3A-T	41,35 ± 0,17	0,64 ± 0,001	0,311 ± 0,0008
TaGS5-3A-G	42,14 ± 0,19	0,65 ± 0,002	0,308 ± 0,001
p	**0,003**	**0,000**	0,06
TaGASR7-A1			
H1g	42,52 ± 0,24	0,656 ± 0,002	0,307 ± 0,001
H1c	41,14 ± 0,15	0,637 ± 0,001	0,311 ± 0,0008
p	**0,000**	**0,000**	**0,0004**
TaD11-2A			
TaD11-2A-HapI	41,55 ± 0,14	0,629 ± 0,001	0,313 ± 0,0007
TaD11-2A-HapII	41,89 ± 0,33	0,699 ± 0,004	0,296 ± 0,001
p	0,310	**0,000**	**0,000**
TaCYP78A5-2A			
Ap-HapI	36,22 ± 0,44	0,743 ± 0,005	0,279 ± 0,002
Ap-HapII	42,05 ± 0,13	0,634 ± 0,001	0,313 ± 0,0006
p	**0,000**	**0,000**	**0,000**

Примечание. *p* – уровень значимости различий между гаплотипами/аллелями. Полужирным шрифтом выделены статистически значимые различия.

у 6 генотипов (сорт Любава и 5 интрогрессивных линий), которые значимо превосходили генотипы с диким аллелем по TGW, а по длине и ширине зерновки различия были статистически недостоверными (табл. 3). Наши данные подтверждают результаты, полученные в работе Z. Yang et al. [11], в которой при исследовании 22 сортов пшеницы инсерция выявлена только у 3 сортов и показано существенное возрастание TGW у образцов с мутантным аллелем.

Среди изученных нами генотипов пшеницы выявлены только благоприятные гаплотипы гена *TaGW2-6B – Hap-6B-1* (1,8 %) и *Hap-6B-2* (98,2 %), что объясняется их широким распространением во всех регионах, культивирующих пшеницу [12].

Генами, отвечающими как за массу, так и за размер зерен пшеницы, являются также *TaGS3-4A*, *TaGS3-D1*, *TaGS5-3A* и *TaGASR7-A1*, для которых известны следующие благоприятные гаплотипы: *HAP-4A-1* и *HAP-4A-2* (*TaGS3-4A*), *TaGS-D1a* (*TaGS3-D1*), *TaGS5-3A-T* (*TaGS5-3A*) и *H1c* (*TaGASR7-A1*) [13, 14, 19]. В нашей коллекции благоприятный гаплотип *HAP-4A-2* имели только 3,6 % генотипов (рисунок), в то время как неблагоприятный гаплотип *HAP-4A-3* – 56,36 %, что



Частота встречаемости благоприятных гаплотипов/аллелей генов, ассоциированных с признаками размера и массы зерна, в четырех группах генотипов пшеницы

The frequency favorable gene haplotypes/alleles associated with grain size and weight traits in four groups of wheat genotypes

соответствует данным других ученых, которые показали, что доля благоприятных гаплотипов гена *TaGS3-4A* в мировой коллекции пшеницы была на низком уровне [13]. Следует отметить, что 40,0 % исследованных нами генотипов несли гаплотип *HAP-4A-5*, а их TGW и ширина зерновки были на уровне благоприятного гаплотипа *HAP-4A-2* (табл. 3).

Благоприятный аллель *TaGS-D1a* выявлен нами у 60,0 % генотипов. Однако сорта белорусской селекции Рассвет, Дарья, Тома, Любава и Ласка имели неблагоприятный аллель *TaGS-D1b*. Вероятно, в нашем регионе аллель *TaGS-D1a* не получил широкого распространения. Например, исследование 617 линий из 18 стран показало высокую частоту встречаемости *TaGS-D1a* среди образцов из Японии (87,5 %), Австралии (87,1 %), Канады (83,3 %). У генотипов из европейского региона доля *TaGS-D1a* была гораздо ниже и, как правило, не достигала 50,0 % [20].

В работах зарубежных авторов показан аддитивный эффект между благоприятными гаплотипами генов *TaGW2-6A/TaGW2-6B и TaGS3-4A/TaGS3-D1* [12, 13]. Из 6 комбинаций гаплотипов *TaGS3-4A/TaGS3-D1*, выявленных в нашей коллекции, наиболее благоприятными сочетаниями были *HAP-4A-2/TaGS3-D1a* и *HAP-4A-5/TaGS3-D1a*. Для генотипов с данными комбинациями гаплотипов TGW в среднем составила 43,08 и 42,86 г соответственно, что значимо выше, чем у генотипов с другими комбинациями – *TaGS3-4A/TaGS3-D1* (34,44–42,40 г). Следует отметить, что у тетраплоидных генотипов (*T. dicoccoides*, *T. dicoccum*, линии 11-1 и 13-3), у которых нет гена *TaGS3-D1* из-за отсутствия D-генома, а ген *TaGS3-4A* представлен неблагоприятным гаплотипом *HAP-4A-3*, обнаружены самые низкие значения TGW и ширины зерновки. В нашей коллекции выявлены только благоприятные гаплотипы генов *TaGW2-6A/TaGW2-6B*, при этом сочетание *Hap-6A-G/Hap-6B-1* обеспечивает наибольшую TGW и ширину зерновки (44,87 г и 0,318 мм соответственно).

Генотипирование нашей коллекции по генам *TaGS5-3A* и *TaGASR7-A1* выявило, что для подавляющего числа сортов характерны аллели *TaGS5-3A-T* и *H1c*, в то время как для большинства сородичей пшеницы – *TaGS5-3A-G* и *H1g* соответственно, что согласуется с данными литературы. Установлено, что аллель *TaGS5-3A-T* характерен главным образом для современных сортов (67,73 %), в то время как у стародавних сортов данный аллель имел частоту только 12,98 %, у тетраплоидных образцов – 5,88 %, а у диплоидных сородичей пшеницы не встречался вовсе [14].

Особое значение имеют гены, оказывающие влияние на метаболизм цитокининов, ауксинов и брассиностероидов, поскольку эти гормоны регулируют широкий спектр физиологических процессов, включая рост, развитие и иммунитет растений. Гены, которые участвуют в регуляции работы данных фитогормонов, идентифицированы у пшеницы. Так, известно 5 гаплотипов гена *TaCKX6-D1* (a–e), который кодирует фермент цитокининдегидрогеназу (CKX), отвечающий за деактивацию цитокининов [21]. Ген *TGW6-A1* кодирует белок с активностью ИУК-глюкозогидролазы и играет важную роль в повышении TGW, так как индол-3-уксусная кислота (ИУК) является наиболее распространенным природным ауксином, который активирует деление и растяжение клеток [22]. Гены *TaD11* кодируют ферменты, участвующие в биосинтезе брассиностероидов. У пшеницы выявлены 2 гаплотипа гена *TaD11-2A* (*TaD11-2A-HapI* и *TaD11-2A-HapII*), 1-й из которых ассоциирован с большей шириной зерна и TGW [15]. Анализ транскриптома и гормонального метаболома показал, что ген *TaCYP78A5* участвует в синтезе ауксина (способствует его накоплению) и экспрессируется в завязи и семенной оболочке зерна пшеницы. Пять SNP в промоторной области данного гена определяют 2 гаплотипа (*Ap-HapI* и *Ap-HapII*) и влияют на TGW и урожайность пшеницы [16].

KASP-генотипирование нашей коллекции выявило у всех генотипов наличие неблагоприятного гаплотипа *TaCKX6-D1b* и благоприятного гаплотипа *TaTGW6-A1a*. Результаты исследований зарубежных ученых показали, что благоприятный гаплотип *TaCKX6-D1a* очень редко встречается в генофонде европейских сортов [5], а гаплотип *TaTGW6-A1a*, напротив, подвергался положительному селекционному отбору и обнаружен более чем у 80,0 % генотипов из 242 сортов зарубежной (в том числе китайской) селекции [22]. Генотипы с гаплотипами *TaD11-2A-HapI* и *Ap-HapII* характеризовались большей шириной зерновки и TGW, чем с *TaD11-2A-HapII* и *Ap-HapI* (табл. 3), при этом все исследованные нами сорта имели благоприятные гаплотипы генов *TaD11-2A* и *TaCYP78A5*.

Во всей коллекции доля благоприятных гаплотипов/аллелей большинства генов была на высоком уровне (60,0–100,0 %), но у сородичей пшеницы она, как правило, была меньше, чем у сортов (рисунок). Например, мутантный аллель *TaGW2-6A* и гаплотип *HAP-4A-2* гена *TaGS3-4A*, ассоциированные с высокой TGW, отсутствовали у всех родственных видов (рисунок). Среди образцов сородичей пшеницы благоприятный гаплотип *TaD11-2A-HapI* выявлен только у *T. dicoccum* и *T. spelta*, а *Ap-HapII* – у *T. dicoccum* и *T. kiharae*. Полученные результаты указывают на отбор гаплотипов, ассоциированных с повышенной TGW, в процессе селекции, что подтверждает результаты исследований зарубежных коллег, которые установили, что *HAP-4A-2*, *TaD11-2A-HapI* и *Ap-HapII* встречались чаще у современных, чем у стародавних сортов [13, 15, 16]. Но если благоприятный аллель *TaGS3-D1a* имели только 50,0 % сортов нашей коллекции, то все изученные гексаплоидные образцы сородичей пшеницы несли данный аллель (у тетраплоидных образцов ген *TaGS3-D1* отсутствует, поскольку располагается на D-геноме). Следует отметить, что большая часть линий пшеницы с чужеродным генетическим материалом имела предпочтительные гаплотипы изученных генов, за исключением *TaGW2-6A* и *TaGS3-4A* (рисунок), благоприятные варианты которых редко встречаются во всех регионах мира, выращивающих пшеницу. Для большинства генотипов с высокой TGW характерен следующий набор гаплотипов: *TaGS3-D1a*, *H1c*, *Hap-6A-G*, *Hap-6B-2*, *TaD11-2A-HapI* и *Ap-HapII*, что позволяет рассматривать данный набор как потенциально благоприятный для увеличения массы зерна пшеницы в условиях Беларуси.

Заключение. В коллекции из 55 генотипов пшеницы, включающей сорта *T. aestivum* L., образцы видов рода *Triticum* и интрогрессивные линии, полученные на их основе, определен аллельный состав 10 генов, ассоциированных с размером и массой зерен: *TaGW2-6A*, *TaGW2-6B*, *TaTGW6-A1*, *TaGs3-4A*, *TaGs5-3A*, *TaGs3-D1*, *TaGASR7-A1*, *TaCKX6-D1*, *TaD11-2A*, *TaCYP78A5-2A*. Данные гены оказывали значимый вклад в изменчивость изученных признаков, за исключением генов *TaGW2-6A* и *TaD11-2A*, для которых не выявлена роль в формировании морфометрических показателей зерна пшеницы и TGW соответственно. Во всей коллекции доля благоприятных гаплотипов/аллелей большинства генов была на высоком уровне (60,0–100,0 %); редко встречались благоприятные гаплотипы генов *TaGW2-6A* (10,9 %) и *TaGS3-4A* (3,6 %), которые не получили широкого распространения во всех регионах, выращивающих пшеницу. У сортов частота

встречаемости предпочтительных гаплотипов/аллелей была выше, чем у родственных видов, что подтверждает их отбор в процессе селекции, большая часть интрогрессивных линий имела варианты изученных генов, ассоциированные с повышенной TGW. У генотипов с высокой TGW чаще всего отмечено следующее сочетание гаплотипов: *TaGS3-D1a*, *H1c*, *Hap-6A-G*, *Hap-6B-2*, *TaD11-2A-HapI* и *Ap-HapII*.

Установлено, что у интрогрессивных линий в среднем за двухлетний период исследования значения изученных признаков были ближе к значениям сортов, при этом длина зерновки была значимо выше, а ширина – значимо ниже. TGW интрогрессивных линий больше, чем у родительских форм, но статистически значимое превосходство установлено только по сравнению с родственными видами. 19 интрогрессивных линий из 40 изученных достоверно превышали родительский сорт по TGW, при этом 11 из них также характеризовались высокими показателями по содержанию белка и клейковины в зерне, что указывает на возможность создания линий с включением чужеродного генетического материала, сочетающих высокую массу и качество зерна.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке проекта 2.10.2 ГПНИ «Биотехнологии-2». Авторы выражают благодарность канд. биол. наук, вед. науч. сотруднику Института генетики и цитологии НАН Беларуси Е. В. Лагуновской за проведение KASP-генотипирования.

Acknowledgements. The work was carried out under the support of project 2.10.2. of the State Program for Fundamental Research “Biotechnology-2”. The authors express their gratitude to Ph. D. (Biol.), Leading Researcher of the Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Sciences of Belarus E. V. Lagunovskaya for conducting KASP genotyping.

Список использованных источников

1. Biofortification and bioavailability of Zn, Fe and Se in wheat: present status and future prospects / P. K. Gupta, H. S. Balyan, S. Sharma, R. Kumar // Theoretical and Applied Genetics – 2021. – Vol. 134, N 1. – P. 1–35. https://doi.org/10.1007/s00122-020-03709-7

2. Zeibig, F. The grain quality of wheat wild relatives in the evolutionary context / F. Zeibig, B. Kilian, M. Frei // Theoretical and Applied Genetics. – 2022. – Vol. 135, N 11. – P. 4029–4048. https://doi.org/10.1007/s00122-021-04013-8

3. Орловская, О. А. Влияние интрогрессии чужеродного генетического материала на основные показатели качества зерна мягкой пшеницы / О. А. Орловская, Л. В. Хотылёва, А. В. Кильчевский // Молекулярная и прикладная генетика: сб. науч. тр. / Ин-т генетики и цитологии НАН Беларуси; гл. ред. А. В. Кильчевский. – Мн., 2024. – Т. 36. – С. 24–34.

4. Dissecting the genetics underlying the relationship between protein content and grain yield in a large hybrid wheat population / P. Thorwarth, G. Liu, E. Ebmeyer [et al.] // Theoretical and Applied Genetics. – 2019. – Vol. 132, N 2. – P. 489–500. https://doi.org/10.1007/s00122-018-3236-x

5. Validation of Candidate Gene-Based Markers and Identification of Novel Loci for Thousand-Grain Weight in Spring Bread Wheat / D. Sehgal, S. Mondal, C. Guzman [et al.] // Frontiers in Plant Science. – 2019. – Vol. 10. – Art. 1189. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01189

6. Li, N. Molecular Networks of Seed Size Control in Plants / N. Li, R. Xu, Y. Li // Annual Review of Plant Biology. – 2019. – Vol. 70. – P. 435–463. https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-050718-095851

7. Dissection of Genetic Basis Underpinning Kernel Weight-Related Traits in Common Wheat / S. Li, L. Wang, Y. Meng [et al.] // Plants. – 2021. – Vol. 10, N 4. – Art. 713. https://doi.org/10.3390/ plants10040713

8. Genetic architecture underpinning yield component traits in wheat / Sh. Cao, D. Xu, M. Hanif [et al.] // Theoretical and Applied Genetics. – 2020. – Vol. 133, N 6. – P. 1811–1823. https://doi.org/10.1007/s00122-020-03562-8

9. Ассоциация генов, контролирующих синтез крахмала, с основными признаками продуктивности у линий мягкой пшеницы с интрогрессиями чужеродного генетического материала / О. А. Орловская, К. К. Яцевич, Л. В. Милько, А. В. Кильчевский // Весці Нацыянальнай Акадэміі нвук Беларусі. Серыя біялагічных навук. – 2025. – Т. 70, № 4. – С. 293–303.

10. Function of *TaGW2-6A* and its effect on grain weight in wheat (*Triticum aestivum* L.) / X. Zhang, J. Chen, C. Shi [et al.] // Euphytica. – 2013. – Vol. 192, N 3. – P. 347–357. https://doi.org/10.1007/s10681-012-0858-y

11. SNP identification and allelic-specific PCR markers development for *TaGW2*, a gene linked to wheat kernel weight / Z. Yang, Z. Bai, X. Li [et al.] // Theoretical and Applied Genetics. – 2012. – Vol. 125, N 5. – P. 1057–1068. https://doi.org/10.1007/s00122-012-1895-6

12. Homologous haplotypes, expression, genetic effects and geographic distribution of the wheat yield gene *TaGW2* / L. Qin, Ch. Hao, J. Hou [et al.] // BMC Plant Biology. – 2014. – Vol. 14. – Art. 107. https://doi.org/10.1186/1471-2229-14-107

13. Functional markers developed from *TaGS3*, a negative regulator of grain weight and size, for marker-assisted selection in wheat / W. Zhang, H. Li, L. Zhi [et al.] // The Crop Journal. – 2020. – Vol. 8, N 6 – P. 943–952. https://doi.org/10.1016/j.cj.2020.03.003

14. *TaGS5-3A*, a grain size gene selected during wheat improvement for larger kernel and yield / L. Ma, T. Li, Ch. Hao [et al.] // Plant Biotechnology Journal. – 2016. – Vol. 14, N 5. – P. 1269–1280. https://doi.org/10.1111/pbi.12492

15. The brassinosteroid biosynthesis gene *TaD11-2A* controls grain size and its elite haplotype improves wheat grain yields / H. Xu, H. Sun, J. Dong [et al.] // Theoretical and Applied Genetics. – 2022. – Vol. 135, N 8. – P. 2907–2923. https://doi.org/10.1007/s00122-022-04158-0

16. Modified expression of *TaCYP78A5* enhances grain weight with yield potential by accumulating auxin in wheat (*Triticum aestivum* L.) / L. Guo, M. Ma, L. Wu [et al.] // Plant Biotechnology Journal. – 2021. – Vol. 20, N 1. – P. 168–182. https://doi.org/10.1111/pbi.13704

17. Лагуновская, Е. В. Оценка гомозиготности и аллельного состава генов, ассоциированных с хозяйственно ценными признаками, у линий удвоенных гаплоидов пшеницы и тритикале / Е. В. Лагуновская // Молекулярная и прикладная генетика: сб. науч. тр. / Ин-т генетики и цитологии НАН Беларуси; гл. ред. А. В. Кильчевский. – Мн., 2023. – Т. 34. – С. 28–40.

18. Identification and development of a functional marker of *TaGW2* associated with grain weight in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) / Z. Su, Ch. Hao, L. Wang [et al.] // Theoretical and Applied Genetics. – 2011. – Vol. 122, N 1. – P. 211–223. https://doi.org/10.1007/s00122-010-1437-z

19. Natural variation of *TaGASR7-A1* affects grain length in common wheat under multiple cultivation conditions / L. Dong, F. Wang, T. Liu [et al.] // Molecular Breeding. – 2014. – Vol. 34, N 3. – P. 937–947. https://doi.org/10.1007/s11032-014-0087-2

20. *TaGS-D1*, an ortholog of rice *OsGS3*, is associated with grain weight and grain length in common wheat / Y. Zhang, J. Liu, X. Xia, Z. He // Molecular Breeding. – 2014. – Vol. 34, N 3. – P. 1097–1107. https://doi.org/10.1007/s11032-014-0102-7

21. *TaCKX6-D1*, the ortholog of rice *OsCKX2*, is associated with grain weight in hexaploid wheat / L. Zhang, Y.-L. Zhao, L.-F. Gao [et al.] // New Phytologist. – 2012. – Vol. 195, N 3. – P. 574–584. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04194.x

22. *TaTGW6-A1*, an ortholog of rice *TGW6*, is associated with grain weight and yield in bread wheat / M. Hanif, F. Gao, J. Liu [et al.] // Molecular Breeding. – 2016. – Vol. 36. – Art. 1. https://doi.org/10.1007/s11032-015-0425-z

References

1. Gupta P. K., Balyan H. S., Sharma S., Kumar R. Biofortification and bioavailability of Zn, Fe and Se in wheat: present status and future prospects. *Theoretical and Applied Genetics*, 2021, vol. 134, no. 1, pp. 1–35. https://doi.org/10.1007/s00122-020-03709-7

2. Zeibig F., Kilian B., Frei M. The grain quality of wheat wild relatives in the evolutionary context. *Theoretical and Applied Genetics*, 2022, vol. 135, no. 11, pp. 4029–4048. https://doi.org/10.1007/s00122-021-04013-8

3. Orlovskaya O. A., Khotyleva L. V., Kil'chevskii A. V. Effect of foreign genetic material introgression on the main grain quality indices of common wheat. *Molekulyarnaya i prikladnaya genetika: sbornik nauchnykh trudov* [Molecular and Applied Genetics: A Collection of Scientific Papers]. Minsk, 2024, vol. 36, pp. 24–34 (in Russian).

4. Thorwarth P., Liu G., Ebmeyer E., Schacht J., Schachschneider R., Kazman E., Reif J. Ch., Würschum T., Longin C. F. H. Dissecting the genetics underlying the relationship between protein content and grain yield in a large hybrid wheat population. *Theoretical and Applied Genetics*, 2019, vol. 132, no. 2, pp. 489–500. https://doi.org/10.1007/s00122-018-3236-x

5. Sehgal D., Mondal S., Guzman C., Garcia Barrios G., Franco C., Singh R., Dreisigacker S. Validation of Candidate Gene-Based Markers and Identification of Novel Loci for Thousand-Grain Weight in Spring Bread Wheat. *Frontiers in Plant Science*, 2019, vol. 10, art. 1189. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01189

6. Li N., Xu R., Li Y. Molecular Networks of Seed Size Control in Plants. *Annual Review of Plant Biology*, 2019, vol. 70, pp. 435–463. https://doi.org/10.1146/ annurev-arplant-050718-095851

7. Li S., Wang L., Meng Y., Hao Y., Xu H., Hao M., Lan S., Zhang Y., Lv L., Zhang K., Peng X., Lan C., Li X., Zhang Y. Dissection of Genetic Basis Underpinning Kernel Weight-Related Traits in Common Wheat. *Plants*, 2021, vol. 10, no. 4, art. 713. https://doi.org/10.3390/ plants10040713

8. Cao Sh., Xu D., Hanif M., Xia X., He Z. Genetic architecture underpinning yield component traits in wheat. *Theoretical and Applied Genetics*, 2020, vol. 133, no. 6, pp. 1811–1823. https://doi.org/10.1007/s00122-020-03562-8

9. Orlovskaya O. A., Yatsevich K. K., Mil'ko L. V., Kil'chevskii A. V. Association of genes controlling starch synthesis with main productivity traits in common wheat lines with the introgressions of the alien genetic material. *Vestsi Hatsyyanal'nai Akademii nvuk Belarusi. Seryya biyalagichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological series*, 2025, vol. 70, no. 4, pp. 293–303 (in Russian).

10. Zhang X., Chen J., Shi C., Chen J., Zheng F., Tian J. Function of *TaGW2-6A* and its effect on grain weight in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Euphytica*, 2013, vol. 192, no. 3, pp. 347–357. https://doi.org/10.1007/s10681-012-0858-y

11. Yang Z., Bai Z., Li X., Wang P., Wu Q., Yang L., Li L., Li X. SNP identification and allelic-specific PCR markers development for *TaGW2*, a gene linked to wheat kernel weight. *Theoretical and Applied Genetics*, 2012, vol. 125, no. 5, pp. 1057–1068. https://doi.org/10.1007/s00122-012-1895-6

12. Qin L., Hao Ch., Hou J., Wang Y., Li T., Wang L., Ma Z., Zhang X. Homologous haplotypes, expression, genetic effects and geographic distribution of the wheat yield gene *TaGW2*. *BMC Plant Biology*, 2014, vol. 14, art. 107. https://doi.org/10.1186/1471-2229-14-107

13. Zhang W., Li H., Zhi L., Su Q., Liu J., Ren X., Meng D., Zhang N., Ji J., Zhang X., Li J. Functional markers developed from *TaGS3*, a negative regulator of grain weight and size, for marker-assisted selection in wheat. *The Crop Journal*, 2020, vol. 8, no. 6, pp. 943–952. https://doi.org/10.1016/j.cj.2020.03.003

14. Ma L., Li T., Hao Ch., Wang Y., Chen X., Zhang X. *TaGS5- 3A*, a grain size gene selected during wheat improvement for larger kernel and yield. *Plant Biotechnology Journal*, 2016, vol. 14, no. 5, pp. 1269–1280. https://doi.org/10.1111/pbi.12492

15. Xu H., Sun H., Dong J., Ma Ch., Li J., Li Z. [et al.]. The brassinosteroid biosynthesis gene *TaD11-2A* controls grain size and its elite haplotype improves wheat grain yields. *Theoretical and Applied Genetics*, 2022, vol. 135, no. 8, pp. 2907–2923. https://doi.org/10.1007/s00122-022-04158-0

16. Guo L., Ma M., Wu L., Zhou M., Li M., Wu B., Li L., Liu X., Jing R., Chen W., Zhao H. Modified expression of *TaCYP78A5* enhances grain weight with yield potential by accumulating auxin in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant Biotechnology Journal*, 2021, vol. 20, no. 1, pp. 168–182. https://doi.org/10.1111/pbi.13704

17. Lagunovskaya E. V. Evaluation of homozygosity and the allelic composition of genes associated with economically valuable traits in doubled haploid wheat and triticale lines. *Molekulyarnaya i prikladnaya genetika: sbornik nauchnykh trudov* [Molecular and Applied Genetics: A Collection of Scientific Papers]. Minsk, 2024, vol. 34, pp. 28–40 (in Russian).

18. Su Z., Hao Ch., Wang L., Dong Y., Zhang X. Identification and development of a functional marker of *TaGW2* associated with grain weight in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Theoretical and Applied Genetics*, 2011, vol. 122, no. 1, pp. 211–223. https://doi.org/10.1007/s00122-010-1437-z

19. Dong L., Wang F., Liu T., Dong Z., Li A., Jing R., Mao L., Li Y., Liu X., Zhang K., Wang D. Natural variation of *TaGASR7-A1* affects grain length in common wheat under multiple cultivation conditions. *Molecular Breeding*, 2014, vol. 34, no. 3, pp. 937–947. https://doi.org/10.1007/s11032-014-0087-2

20. Zhang Y., Liu J., Xia X., He Z. *TaGS-D1*, an ortholog of rice *OsGS3*, is associated with grain weight and grain length in common wheat. *Molecular Breeding*, 2014, vol. 34, no. 3, pp. 1097–1107. https://doi.org/10.1007/s11032-014-0102-7

21. Zhang L., Zhao Y.-L., Gao L.-F., Zhao G.-Y., Zhou R.-H., Zhang B.-S., Jia J.-Z. *TaCKX6-D1*, the ortholog of rice *OsCKX2*, is associated with grain weight in hexaploid wheat. *New Phytologist*, 2012, vol. 195, no. 3, pp. 574–584. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04194.x

22. Hanif M., Gao F., Liu J., Wen W., Zhang Y., Rasheed A., Xia X., He Z., Cao S. *TaTGW6-A1*, an ortholog of rice *TGW6*, is associated with grain weight and yield in bread wheat. *Molecular Breeding*, 2016, vol. 36, art. 1. https://doi.org/10.1007/s11032-015-0425-z

Информация об авторах

Орловская Ольга Александровна – канд. биол. наук, доцент, вед. науч. сотрудник. Институт генетики и цитологии НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: o.orlovskaya@igc.by. https://orcid.org/0000-0002-1187-1317

Яцевич Констанция Константиновна – науч. сотрудник. Институт генетики и цитологии НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: K.Yatsevich@igc.by. https://orcid.org/0009-0001-7040-4671

Милько Лариса Викентьевна – науч. сотрудник. Институт генетики и цитологии НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: L.Milko@igc.by

Кильчевский Александр Владимирович – академик, д-р биол. наук, профессор, заведующий лабораторией. Институт генетики и цитологии НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: Kilchev@presidium.bas-net.by. https://orcid.org/0000-0002-0175-9786

Information about the authors

Olga A. Orlovskaya – 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: o.orlovskaya@igc.by. https://orcid.org/0000-0002-1187-1317

Kanstantsyia K. Yatsevich – Researcher. Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: K.Yatsevich@igc.by. https://orcid.org/0009-0001-7040-4671

Larisa V. Milko – Researcher. Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: L.Milko@igc.by

Alexander V. Kilchevsky – Academician, D. Sc. (Biol.), Professor, Head of the Laboratory. Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Kilchev@presidium.bas-net.by. https://orcid.org/0000-0002-0175-9786

ISSN 1029-8940 (Print)
ISSN 2524-230X (Online)
УДК 581.14; 577.175.1
https://doi.org/10.29235/1029-8940-2026-71-4-292-299

Поступила в редакцию 04.05.2026
Received 04.05.2026

А. А. Боровик, П. А. Небышинец, Т. В. Самович, Н. А. Ламан

Институт экспериментальной ботаники имени В. Ф. Купревича Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

ФИЗИОЛОГО-БИОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РОСТА ПРОРОСТКОВ САХАРНОЙ СВЕКЛЫ ПРИ ПРЕДПОСЕВНОЙ ОБРАБОТКЕ СЕМЯН БРАССИНОСТЕРОИДАМИ

Аннотация. В статье приведены результаты анализа проростков сахарной свеклы, семена которых перед посевом были инкрустированы защитно-стимулирующими составами (ЗСС) на основе поливинилацетатной дисперсии (ПВА), содержащими брассинолид (БЛ, ЗСС-БЛ) или эпибрассинолид (ЭБЛ, ЗСС-ЭБЛ) в концентрации 10^{-8} М. Изучены ростовые параметры, содержание фотосинтетических пигментов и фотосинтетическая активность растений. Установлено, что обработка семян ЗСС-ЭБЛ обеспечила увеличение массы корня проростков на 56 % относительно контроля. Методом PAM-флуориметрии выявлено, что ЗСС-БЛ снижает нерегулируемые потери энергии фотосистемы (ФС) II (*Y(NO)*) на 24 % и повышает эффективность работы ФС II (*Y(II)*) на 62 %.

Ключевые слова: сахарная свекла, *Beta vulgaris*, брассиностероиды, брассинолид, эпибрассинолид, предпосевная обработка семян, фотосинтез, PAM-флуориметрия

Для цитирования: Физиолого-биохимические особенности роста проростков сахарной свеклы при предпосевной обработке семян брассиностероидами / А. А. Боровик, П. А. Небышинец, Т. В. Самович, Н. А. Ламан // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя біялагічных навук. – 2026. – Т. 71, № 4. – С. 292–299. https://doi.org/10.29235/1029-8940-2026-71-4-292-299

Anastasiya A. Borovik, Polina A. Nebyshinets, Tatsiana V. Samovich, Nikolai A. Laman

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

PHYSIOLOGICAL AND BIOCHEMICAL FEATURES OF SUGAR BEET SEEDLING GROWTH UNDER PRE-SOWING SEED TREATMENT WITH BRASSINOSTEROIDS

Abstract. The article presents the results of the analysis of sugar beet seedlings whose seeds were encrusted before sowing with protective-stimulating compositions (PSC) based on polyvinyl acetate dispersion (PVA) containing either brassinolide (BL, PSC-BL) or epibrassinolide (EBL, PSC-EBL) at a concentration of 10^{-8} M. Growth parameters, photosynthetic pigment content, and photosynthetic activity of plants were studied. It was found that seed treatment with PSC-EBL provided an increase in the root mass of seedlings by 56 % relative to the control. Using PAM-fluorimetry, it was revealed that PSC-BL reduces unregulated energy losses of photosystem (PS) II (*Y(NO)*) by 24 % and increased the efficiency of PS II (*Y(II)*) by 62 %.

Keywords: sugar beet, *Beta vulgaris*, brassinosteroids, brassinolide, epibrassinolide, pre-sowing seed treatment, photosynthesis, PAM-fluorimetry

For citation: Borovik A. A., Nebyshinets P. A., Samovich T. V., Laman N. A. Physiological and biochemical features of sugar beet seedling growth under pre-sowing seed treatment with brassinosteroids. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya biyalagichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological series*, 2026, vol. 71, no. 4, pp. 292–299 (in Russian). https://doi.org/10.29235/1029-8940-2026-71-4-292-299

Введение. Сахарная свекла (*Beta vulgaris* L. ssp. *vulgaris* var. *altissima*) – важная техническая культура умеренной климатической зоны, обеспечивающая до 30–40 % мирового производства сахара [1, 2]. Наряду с сахарной свеклой, хозяйственно значимыми формами рода *Beta* являются столовая свекла (*Beta vulgaris* ssp. *vulgaris* var. *vulgaris*), кормовая свекла и листовая свекла мангольд (*Beta vulgaris* ssp. *vulgaris* var. *cicla*) [3].

В Республике Беларусь выращивание сахарной свеклы играет важную роль в обеспечении продовольственной безопасности и экспортного потенциала страны [4]. Однако стабильное развитие отрасли сталкивается с рядом лимитирующих факторов. Анализ климатических данных последних десятилетий продемонстрировал учащение продолжительных засушливых перио-

дов в середине и конце вегетационного сезона. Так, в засушливые годы (2010, 2015, 2018, 2022) потери урожая сахарной свеклы превысили 30 % и значительно снизилась сахаристость корнеплодов – с 18–20 до 14–15 % [5, 6].

Проблему также представляет и эндогенный дефицит питания проростков современных односемянных гибридов. Эволюционный переход от многосемянных диких форм к технологичным односемянным, удобным для механизированного сева, привел к существенному сокращению стартовых запасов питательных веществ для прорастающего зародыша. Немаловажным аспектом является не только общая масса, но и доля зародыша в структуре семени, которая составляет 20–30 %. Это означает, что ограниченный запас питательных веществ, получаемый зародышем культурной свеклы для старта, лимитирует энергию прорастания, рост и устойчивость проростков. Дополнительным негативным фактором является наличие в паренхимной ткани перикарпия ингибиторов прорастания, которые замедляют и подавляют всхожесть, вынуждая проводить более мелкую заделку семян [7].

Ситуация усугубляется высокой импортозависимостью в семеноводстве сахарной свеклы, которая достигает для Республики Беларусь 90–95 % [8]. Низкая эффективность отечественного семеноводства, связанная с неполным вызреванием семян на втором году вегетации в погодных условиях Беларуси и отсутствием заводов по их дражированию, увеличивает перечень проблем.

В связи с этим актуальным представляется разработка и применение защитно-стимулирующих составов (ЗСС) для предпосевной обработки семян, которые позволили бы компенсировать эндогенный дефицит питания, нивелировать действие ингибиторов прорастания и повысить стрессоустойчивость проростков на начальных этапах онтогенеза. Среди широкого спектра физиологически активных соединений, способных эффективно решать эти задачи, особого внимания заслуживают брассиностероиды (БС).

БС представляют собой класс полигидроксилированных стероидных фитогормонов, к которым относятся брассинолиды (БЛ) и их стереоизомеры эпибрассинолиды (ЭБЛ). Они обладают высокой физиологической активностью в сверхнизких концентрациях (10^{-6}–10^{-10} М) [9, 10]. В ряде работ показано, что БС участвуют в регуляции широкого спектра физиологических процессов: стимуляции деления и растяжения клеток, индукции синтеза стресс-индуцированных белков, активации антиоксидантной системы, стабилизации клеточных мембран и повышении эффективности функционирования фотосинтетического аппарата в неблагоприятных условиях [11–13].

Вместе с тем, несмотря на доказанную эффективность БС в регуляции роста и развития многих видов растений, данные об их действии на представителей семейства *Amaranthaceae* остаются фрагментарными.

Цель данного исследования – определить влияние предпосевной обработки семян ЗСС-БЛ и ЗСС-ЭБЛ в концентрации 10^{-8} М на морфофизиологические параметры и функциональное состояние фотосинтетического аппарата у растений сахарной свеклы на начальных этапах онтогенеза.

Объекты и методы исследования. В качестве объекта исследования был использован триплоидный гибрид сахарной свеклы урожайно-сахаристого направления Каскад 3 F1, зарегистрированный в 2006 г. Выбор данного гибрида для эксперимента обусловлен его высокой адаптацией к стрессовым факторам.

Основой для создания ЗСС послужила базовая пленкообразующая композиция на основе поливинилацетатной дисперсии (ПВА) – водорастворимого синтетического полимера, широко применяемого в сельскохозяйственной практике для инкрустации и дражирования семян. ПВА формирует на поверхности семени тонкую прочную пленку, обеспечивающую удержание биологически активных веществ и их постепенное высвобождение в процессе прорастания.

На основе этой композиции были приготовлены два защитно-стимулирующих состава: ЗСС-БЛ, содержащий БЛ в концентрации 10^{-8} М, и ЗСС-ЭБЛ, содержащий ЭБЛ в той же концентрации. Использованные в работе природные БС получены в лаборатории химии стероидов Института биоорганической химии НАН Беларуси.

Инкрустацию семян проводили вручную из расчета 20 мкл рабочего раствора на 1 г семян (что соответствует 20 л/т в производственных условиях). Семена тщательно перемешивали с рас-

четным объемом ЗСС до равномерного покрытия, после чего подсушивали в течение 24 ч при комнатной температуре. Контролем служили необработанные семена.

Растения выращивали в контролируемых лабораторных условиях в пластиковых стаканах объемом 0,5 л в почвенном субстрате «Двина» с агроперлитом в соотношении 3 : 1 в течение 30 сут, при температуре 22–23 °С, фотопериод – 14 ч света / 10 ч темноты, освещенность составляла 17 000–18 000 лк. Полив осуществляли, поддерживая влажность субстрата на уровне 78–80 %. Повторность каждого варианта опыта – трехкратная.

Содержание фотосинтетических пигментов определяли методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) на хроматографе Dionex UltiMate 3000 (Thermo Fisher Scientific, Германия) [14–16]. Параметры фотохимической активности фотосистем (ФС) I и II измеряли с помощью измерительного комплекса Dual-PAM-100 (Heinz Walz, Германия) с модулем регистрации флуоресценции ФС II и двухволновым (830/875 нм) модулем регистрации сигнала первичного донора ФС I (P700) по стандартным протоколам [17]. Содержание водорастворимых фенольных соединений определяли спектрофотометрическим методом с реактивом Фолина – Чокальтеу в модификации V. L. Singleton и J. A. Rossi [18].

Статистическую обработку экспериментальных данных проводили с использованием программного обеспечения Microsoft Excel и пакета прикладных программ для статистического анализа. Проверку статистической значимости результатов исследования относительно контроля выполняли с помощью однофакторного дисперсионного анализа (One-Way ANOVA) с последующим применением пост-хок теста Тьюки (Tukey HSD). Изменения считали достоверными при следующих уровнях значимости: $^{*} - p \leq 0{,}05$; $^{**} - p \leq 0{,}01$; $^{***} - p \leq 0{,}001$ (табл. 1, 2; рисунок). Все диаграммы построены с помощью программы SigmaPlot 15.0.

Результаты и их обсуждение. Важным этапом перед введением в ЗСС фитогормонов является оценка потенциального влияния самой пленкообразующей основы на посевные качества семян. С этой целью был проведен модельный эксперимент, в котором семена были обработаны базовым пленкообразующим составом без добавления БС.

Полученные результаты не выявили статистически значимых различий между вариантами обработки базовым составом и контролем. Отсутствие негативного воздействия позволило заключить, что формирующаяся пленка может служить эффективной основой для создания ЗСС.

Анализ морфометрических показателей проростков сахарной свеклы выявил, что применение БС в составе ЗСС сопровождалось достоверной стимуляцией ростовых процессов (табл. 1). Длина надземной части проростков увеличилась на 32,2 % ($p < 0{,}01$) под действием ЗСС-БЛ и на 23,0 % ($p < 0{,}05$) – при обработке ЗСС-ЭБЛ относительно контроля. Длина корня также возросла на 10,5 и 24,1 % соответственно.

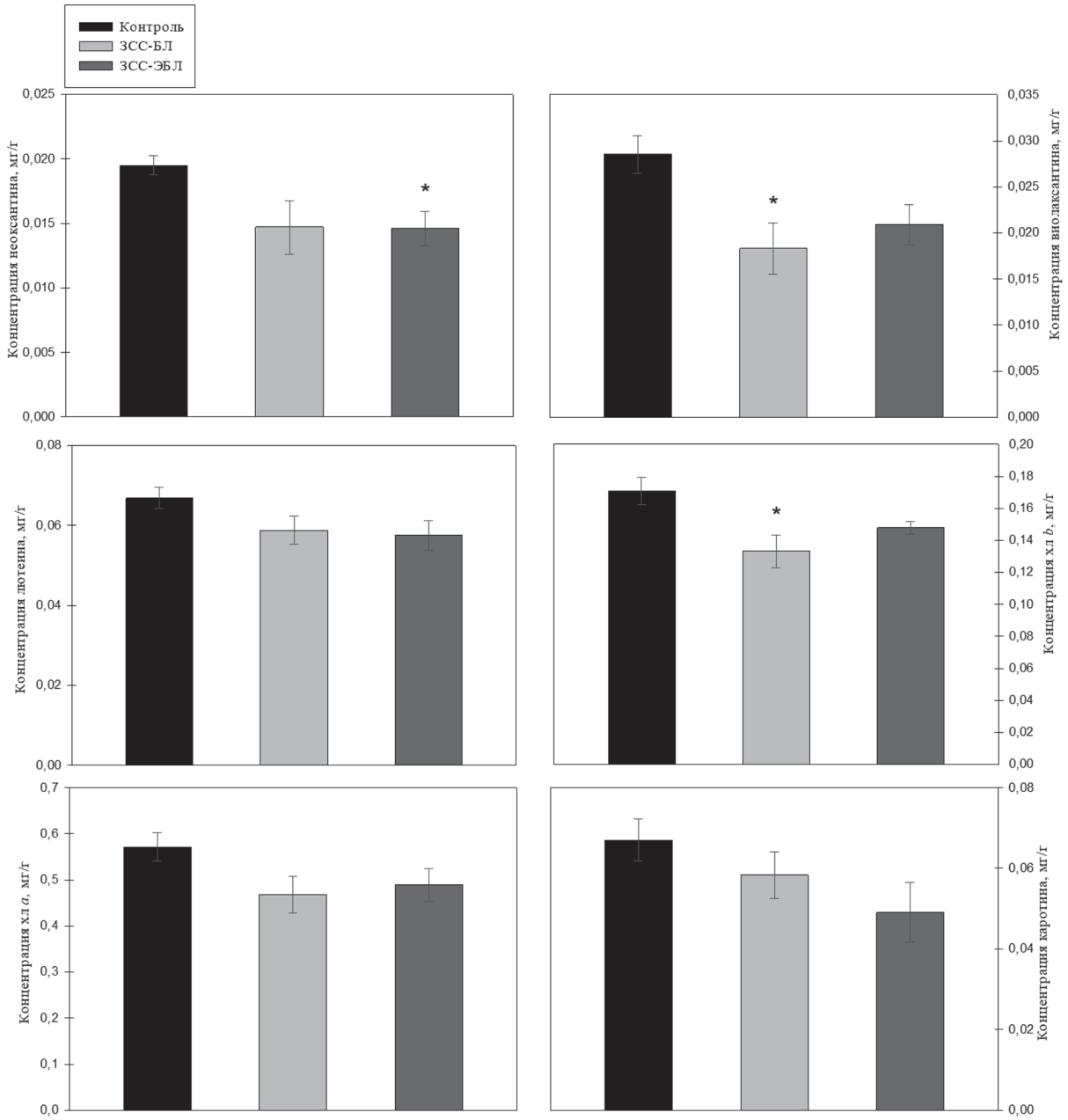
Таблица 1. **Влияние предпосевной обработки семян ЗСС на морфометрические показатели проростков сахарной свеклы сорта Каскад**

Table 1. **Effect of pre-sowing seed treatment with PSCs on morphometric parameters of sugar beet seedlings of the Cascade variety**

Вариант	Длина проростка, мм	Длина корня, мм	Масса проростка, г	Масса корня, г	Количество листьев, шт.
Контроль	97,33 ± 7,49	138,44 ± 16,64	1,57 ± 0,17	0,20 ± 0,03	5,11 ± 0,39
ЗСС-БЛ	128,57 ± 3,73**	152,86 ± 19,75	2,12 ± 0,50	0,28 ± 0,07	5,43 ± 0,30
ЗСС-ЭБЛ	119,67 ± 5,58*	171,67 ± 30,67	2,59 ± 0,16*	0,31 ± 0,09	5,5 ± 0,22

Наиболее выраженный эффект был отмечен по накоплению биомассы. Масса проростка сахарной свеклы возросла на 35 % в варианте с ЗСС-БЛ и на 65% ($p < 0{,}05$) – при обработке ЗСС-ЭБЛ. Аналогичная тенденция наблюдалась для массы корня, которая увеличилась на 40,1 % (ЗСС-БЛ) и 56,3 % (ЗСС-ЭБЛ).

Одним из основных маркеров устойчивости растений к абиотическим стрессам является стабильность и функциональная активность фотосинтетического аппарата. Предпосевная обработка семян регуляторами роста способна оказывать модифицирующее действие на фотосинтетический потенциал проростков, изменяя содержание и соотношение фотосинтетических пигментов, а также параметры фотохимической активности.



Влияние предпосевной обработки семян ЗСС на содержание основных фотосинтетических пигментов в листьях проростков сахарной свеклы (мг/г сырого вещества)

Effect of pre-sowing seed treatment with PSC on the content of major photosynthetic pigments in the leaves of sugar beet seedlings (mg/g fresh weight)

Методом ВЭЖХ проведен анализ содержания индивидуальных фотосинтетических пигментов в листьях 30-дневных проростков сахарной свеклы, семена которой подвергались предпосевной обработке ЗСС с БС [14–16].

Соответствующая обработка приводила к снижению концентрации всех исследованных пигментов, при этом эффект состава с БЛ был более выраженным, чем в варианте с ЭБЛ (рисунок). Наиболее существенное снижение содержания наблюдалось для пула хлорофиллов: под действием ЗСС-БЛ содержание хлорофиллов *a* и *b* уменьшилось на 18,0 и 22,2 % ($p < 0,05$), а при обработке ЗСС-ЭБЛ – на 14,4 и 13,5 % соответственно относительно контроля.

Содержание β-каротина в листьях проростков сахарной свеклы снижалось под действием ЗСС с БС на 13,4 % при обработке ЗСС-БЛ и на 26,9 % – при обработке ЗСС-ЭБЛ по сравнению

с контролем. Уровень неоксантина уменьшался на 25 % в обоих вариантах, однако статистически значимым это снижение было только при применении ЗСС-ЭБЛ ($p < 0,05$). Также зафиксировано достоверное уменьшение содержания виолаксантина и лютеина. Снижение содержания фотосинтетических пигментов в листьях может быть связано с опережающим ростом биомассы под влиянием БС или перераспределением метаболических ресурсов.

Предпосевная обработка существенно повлияла и на эффективность работы ФС I и II (табл. 2). Максимальная квантовая эффективность ФС II F_v/F_m повысилась с 0,761 (контроль) до 0,794 (ЗСС-БЛ) и 0,784 (ЗСС-ЭБЛ), что свидетельствует о сохранении высокого потенциала фотохимических реакций ввиду отсутствия повреждений в реакционном центре ФС II (P680) при обработках. Квантовая эффективность фотохимии ФС II *Y(II)* увеличилась на 61,8 % под действием ЗСС-БЛ и на 35,4 % – при обработке ЗСС-ЭБЛ, отражая интенсификацию линейного электронного транспорта. Существенное снижение квантового выхода нерегулируемых потерь *Y(NO)* (основной индикатор стресса) на 24,3 % ($p < 0,001$) (ЗСС-БЛ) и на 14,4 % ($p < 0,01$) (ЗСС-ЭБЛ) относительно контроля указывает на статистически достоверную минимизацию повреждений ФС II, падение доли пассивных потерь энергии и повышение адаптивных возможностей фотосинтетического аппарата.

Таблица 2. **Влияние предпосевной обработки семян ЗСС на фотохимические параметры фотосинтетического аппарата проростков сахарной свеклы**

Table 2. **Effect of pre-sowing seed treatment with PSCs on photochemical parameters of the photosynthetic apparatus of sugar beet seedlings**

Параметр	Контроль	ЗСС-БЛ	ЗСС-ЭБЛ
F_v/F_m	0,761 ± 0,041	0,794 ± 0,011	0,784 ± 0,011
Y(II)	0,144 ± 0,025	0,233 ± 0,028	0,195 ± 0,030
Y(NO)	0,688 ± 0,015	0,521 ± 0,033***	0,589 ± 0,030**
Y(NPQ)	0,168 ± 0,016	0,246 ± 0,016**	0,216 ± 0,009*
NPQ	0,236 ± 0,023	0,472 ± 0,047***	0,358 ± 0,026**
Y(I)	0,230 ± 0,017	0,331 ± 0,023**	0,292 ± 0,024*
Y(ND)	0,529 ± 0,018	0,478 ± 0,018	0,476 ± 0,015*
Y(NA)	0,241 ± 0,027	0,191 ± 0,015	0,232 ± 0,015
ETR(I)	22,93 ± 1,741	32,94 ± 2,270**	29,07 ± 2,390*

Активизация защитных механизмов подтверждена ростом регулируемого нефотохимического тушения *Y(NPQ)* на 46,4 % ($p < 0,01$) и коэффициента *NPQ* в 2 раза ($p < 0,001$) при обработке ЗСС-БЛ, обеспечив эффективную термическую диссипацию избыточной световой энергии. При обработке ЗСС-ЭБЛ отмечается аналогичная тенденция: увеличение регулируемого нефотохимического тушения *Y(NPQ)* на 28,6 % ($p < 0,05$) и коэффициента *NPQ* на 51,7 % ($p < 0,01$) также указывает на активацию механизмов тепловой диссипации. Однако выраженность данного эффекта была ниже по сравнению с вариантом ЗСС-БЛ, что свидетельствует о менее интенсивной реализации фотозащитных процессов.

Сходные изменения отмечены и для ФС I: увеличение квантового выхода *Y(I)* на 43,9 % ($p < 0,01$) при обработке ЗСС-БЛ и на 27,0 % ($p < 0,05$) – при ЗСС-ЭБЛ, а также скорости электронного транспорта *ETR(I)* на 43,7 % ($p < 0,01$) и 26,8 % ($p < 0,05$) соответственно по сравнению с контролем указывает на активацию электронтранспортной цепи и повышение эффективности фотохимических процессов. Снижение *Y(ND)* примерно на 10 % в обоих вариантах обработки может свидетельствовать об улучшении донорного обеспечения ФС I, тогда как уменьшение *Y(NA)*, особенно выраженное при обработке ЗСС-БЛ (на 20,8 %), отражает ослабление ограничений на акцепторной стороне.

На первый взгляд, снижение концентрации фотосинтетических пигментов противоречит наблюдаемой активации фотохимической активности ФС I и II. Это явление может быть объяснено двумя взаимосвязанными причинами. Во-первых, стимуляция ростовых процессов БС может опережать накопление элементов пигментного комплекса: масса листа увеличивается быстрее, чем в нем синтезируются новые хлорофиллы и каротиноиды, что закономерно снижает

их концентрацию. Во-вторых, и это физиологически более значимо, БС способны повышать эффективность работы пигментного аппарата за счет оптимизации структуры тилакоидных мембран и ускорения транспорта электронов [19]. Данные PAM-флуориметрии подтверждают это: значительное снижение нерегулируемых потерь энергии при одновременном росте эффективности ФС II свидетельствует о том, что фотосинтетический аппарат сохраняет высокую продуктивность даже на фоне сниженной концентрации пигментов.

Важным дополнением к оценке физиолого-биохимического состояния проростков является анализ содержания фенольных соединений, которые участвуют в антиоксидантной защите растений и могут служить маркером ответа на стресс. В связи с этим представляло интерес выяснить, влияет ли предпосевная обработка семян БС на накопление водорастворимых фенолов в листьях сахарной свеклы.

Проведенный анализ показал, что содержание водорастворимых фенольных соединений в проростках сахарной свеклы в целом изменялось незначительно под влиянием предпосевной обработки ЗСС. Различия между вариантами практически отсутствовали: значения в опытных вариантах совпадали с уровнем контроля. Отсутствие увеличения концентрации фенолов дополнительно указывает на то, что обработка ЗСС с БС не индуцирует стрессовых реакций у данной культуры.

Заключение. У проростков сахарной свеклы сорта Каскад наблюдается согласованное усиление ростовых и фотосинтетических процессов под действием обоих составов. Существенное увеличение массы и длины надземной части согласуется с известным действием БС как активаторов растяжения и деления клеток.

Различия в действии двух ЗСС носят количественный, а не качественный характер. Более выраженная активация фотопротекторных механизмов под действием ЗСС-БЛ (двукратный рост *NPQ*) обеспечивает поддержание функциональной стабильности фотосинтетического аппарата при возможных стрессовых воздействиях. В тех случаях, когда целью обработки является повышение продуктивности, предпочтение следует отдавать ЗСС-ЭБЛ, так как он обеспечивает наибольший прирост биомассы при меньшем воздействии на пигментный комплекс. Такая дифференциация эффектов, вероятно, связана с различной скоростью метаболизма и стабильностью структур БС в растительных тканях.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список использованных источников

1. FAOSTAT. Crops and livestock products // Food and Agriculture Organization of the United Nations. – 2022. – URL: https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL (date of access: 24.03.2026).

2. Zhang, Y. OMICS Technologies and Applications in Sugar Beet / Y. Zhang, J. Nan, B. Yu // Frontiers in Plant Science. – 2016. – Vol. 7. – Art. 900. https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00900

3. Lange, W. Taxonomy and cultonomy of beet (*Beta vulgaris* L.) / W. Lange, W. A. Brandenburg, T. S. M. De Block // Botanical Journal of the Linnean Society. – 1999. – Vol. 130, N 1. – P. 81–96. https://doi.org/10.1111/j.1095-8339.1999.tb00785.x

4. Ober, E. S. Abiotic Stress in Sugar Beet / E. S. Ober, A. Rajabi // Sugar Tech. – 2010. – Vol. 12, N 3–4. – P. 294–298. https://doi.org/10.1007/s12355-010-0035-3

5. Jaggard, K. W. The relative effects of drought stress and virus yellows on the yield of sugarbeet in the UK, 1980–95 / K. W. Jaggard, A. M. Dewar, J. D. Pidgeon // The Journal of Agricultural Science. – 1998. – Vol. 130, N 3. – P. 337–343. https://doi.org/10.1017/s0021859698005371

6. Hoffmann, C. M. Sucrose Accumulation in Sugar Beet Under Drought Stress / C. M. Hoffmann // Journal of Agronomy and Crop Science. – 2010. – Vol. 196, N 4. – P. 243–252. https://doi.org/10.1111/j.1439-037x.2009.00415.x

7. Finch-Savage, W. E. Seed vigour and crop establishment: extending performance beyond adaptation / W. E. Finch-Savage, G. W. Bassel // Journal of Experimental Botany. – 2016. – Vol. 67, N 3. – P. 567–591. https://doi.org/10.1093/jxb/erv490

8. Chaves, M. M. Photosynthesis under drought and salt stress: regulation mechanisms from whole plant to cell / M. M. Chaves, J. Flexas, C. Pinheiro // Annals of Botany. – 2009. – Vol. 103, N 4. – P. 551–560. https://doi.org/10.1093/aob/mcn125

9. Lawlor, D. W. Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants / D. W. Lawlor, G. Cornic // Plant, Cell and Environment. – 2002. – Vol. 25, N 2. – P. 275–294. https://doi.org/10.1046/j.0016-8025.2001.00814.x

10. Murchie, E. H. Chlorophyll fluorescence analysis: a guide to good practice and understanding some new applications / E. H. Murchie, T. Lawson // Journal of Experimental Botany. – 2013. – Vol. 64, N 13. – P. 3983–3998. https://doi.org/10.1093/jxb/ert208

11. Emerging roles of plant growth regulators for plants adaptation to abiotic stress–induced oxidative stress / A. Hossain, B. Pamanick, V. K. Venugopalan [et al.] // Emerging Plant Growth Regulators in Agriculture. Roles in Stress Tolerance / eds.: T. Aftab, M. Naeem. – London; San Diego, 2022. – P. 1–72. https://doi.org/10.1016/b978-0-323-91005-7.00010-2

12. Bajguz, A. Brassinosteroids – occurrence and chemical structures in plants / A. Bajguz // Brassinosteroids: A Class of Plant Hormone / eds. S. Hayat, A. Ahmad. – Dordrecht, 2011. – P. 1–27. https://doi.org/10.1007/978-94-007-0189-2_1

13. Divi, U. K. Brassinosteroid: a biotechnological target for enhancing crop yield and stress tolerance / U. K. Divi, P. Krishna // New Biotechnology. – 2009. – Vol. 26, N 3–4. – P. 131–136. https://doi.org/10.1016/j.nbt.2009.07.006

14. Rodriguez-Amaya, D. B. HarvestPlus handbook for carotenoid analysis / D. B. Rodriguez-Amaya, M. Kimura. – Washington: HarvestPlus, 2004. – 63 p.

15. The Identification of Chlorophyll and Its Derivatives in The Pigment Mixtures: HPLC-Chromatography, Visible and Mass Spectroscopy Studies / S. M. Milenković, J. B. Zvezdanović, T. D. Anđelković, D. Z. Marković // Advanced Technologies. – 2012. – Vol. 1, N 1. – P. 16–24.

16. Forni, E. HPLC separation and fluorimetric estimation of chlorophylls and pheophytins in fresh and frozen peas / E. Forni, M. Ghezzi, A. Polesello // Chromatography. – 1988. – Vol. 26, N 1. – P. 120–124. https://doi.org/10.1007/BF02268135

17. Dual-PAM-100 Measuring system for simultaneous assessment of p700 and chlorophyll fluorescence // Walz. – URL: https://www.walz.com/downloads/?filter=dual-pam-100 (date of access: 10.08.2026).

18. Singleton, V. L. Colorimetry of Total Phenolics with Phosphomolybdic-Phosphotungstic Acid Reagents / V. L. Singleton, J. A. Rossi // American Journal of Enology and Viticulture. – 1965. – Vol. 16. – P. 144–158. https://doi.org/10.5344/ajev.1965.16.3.144

19. Holá, D. Brassinosteroids and primary photosynthetic processes / D. Holá // Brassinosteroids in Plant Developmental Biology and Stress Tolerance / eds.: G. J. Ahammed, A. Sharma, J. Yu. – London, 2022. – Ch. 4. – P. 59–104. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-813227-2.00015-1

References

1. FAOSTAT. Crops and livestock products. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. 2022. Avaliable at: https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL (accessed 24.03.2026).

2. Zhang Y., Nan J., Yu B. OMICS Technologies and Applications in Sugar Beet. *Frontiers in Plant Science*, 2016, vol. 7, art. 900. https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00900

3. Lange W., Brandenburg W. A., De Block T. S. M. Taxonomy and cultonomy of beet (*Beta vulgaris* L.). *Botanical Journal of the Linnean Society*, 1999, vol. 130, no. 1, pp. 81–96. https://doi.org/10.1111/j.1095-8339.1999.tb00785.x

4. Ober E. S., Rajabi A. Abiotic Stress in Sugar Beet. *Sugar Tech*, 2010, vol. 12, no. 3–4, pp. 294–298. https://doi.org/10.1007/s12355-010-0035-3

5. Jaggard K. W., Dewar A. M., Pidgeon J. D. The relative effects of drought stress and virus yellows on the yield of sugarbeet in the UK, 1980–95. *The Journal of Agricultural Science*, 1998, vol. 130, no. 3, pp. 337–343. https://doi.org/10.1017/s0021859698005371

6. Hoffmann C. M. Sucrose Accumulation in Sugar Beet Under Drought Stress. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2010, vol. 196, no. 4, pp. 243–252. https://doi.org/10.1111/j.1439-037x.2009.00415.x

7. Finch-Savage W. E., Bassel G. W. Seed vigour and crop establishment: extending performance beyond adaptation. *Journal of Experimental Botany*, 2016, vol. 67, no. 3, pp. 567–591. https://doi.org/10.1093/jxb/erv490

8. Chaves M. M., Flexas J., Pinheiro C. Photosynthesis under drought and salt stress: regulation mechanisms from whole plant to cell. *Annals of Botany*, 2009, vol. 103, no. 4, pp. 551–560. https://doi.org/10.1093/aob/mcn125

9. Lawlor D. W., Cornic G. Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants. *Plant, Cell ad Environment*, 2002, vol. 25, no. 2, pp. 275–294. https://doi.org/10.1046/j.0016-8025.2001.00814.x

10. Murchie E. H., Lawson T. Chlorophyll fluorescence analysis: a guide to good practice and understanding some new applications. *Journal of Experimental Botany*, 2013, vol. 64, no. 13, pp. 3983–3998. https://doi.org/10.1093/jxb/ert208

11. Hossain A., Pamanick B., Venugopalan V. K., Ibrahimova U., Rahman Md. A., Siyal A. L., Maitra S., Chatterjee S., Aftab T. Emerging roles of plant growth regulators for plants adaptation to abiotic stress–induced oxidative stress. *Emerging Plant Growth Regulators in Agriculture. Roles in Stress Tolerance.* London; San Diego, 2022, pp. 1–72. https://doi.org/10.1016/b978-0-323-91005-7.00010-2

12. Bajguz A. Brassinosteroids – occurrence and chemical structures in plants. *Brassinosteroids: A Class of Plant Hormone*. Dordrecht, 2011, pp. 1–27. https://doi.org/10.1007/978-94-007-0189-2_1

13. Divi U. K., Krishna P. Brassinosteroid: a biotechnological target for enhancing crop yield and stress tolerance. *New Biotechnology*, 2009, vol. 26, no. 3–4, pp. 131–136. https://doi.org/10.1016/j.nbt.2009.07.006

14. Rodriguez-Amaya D. B., Kimura M. *HarvestPlus handbook for carotenoid analysis*. Washington: HarvestPlus, 2004. 63 p.

15. Milenković S. M., Zvezdanović J. B., Anđelković T. D., Marković D. Z. The Identification of Chlorophyll and Its Derivatives in The Pigment Mixtures: HPLC-Chromatography, Visible and Mass Spectroscopy Studies. *Advanced technologies*, 2012, vol. 1, no. 1, pp. 16–24.

16. Forni E., Ghezzi M., Polesello A. HPLC separation and fluorimetric estimation of chlorophylls and pheophytins in fresh and frozen peas. *Chromatography*, 1988, vol. 26, no. 1, pp. 120–124. https://doi.org/10.1007/BF02268135

17. Dual-PAM-100 Measuring system for simultaneous assessment of p700 and chlorophyll fluorescence. Walz. Avaliable at: https://www.walz.com/downloads/?filter=dual-pam-100 (accessed 10.08.2026).

18. Singleton V. L., Rossi J. A. Colorimetry of Total Phenolics with Phosphomolybdic-Phosphotungstic Acid Reagents. *American Journal of Enology and Viticulture*, 1965, vol. 16, pp. 144–158. https://doi.org/10.5344/ajev.1965.16.3.144

19. Holá D. Brassinosteroids and primary photosynthetic processes. *Brassinosteroids in Plant Developmental Biology and Stress Tolerance*. London, 2022, pp. 59–104. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-813227-2.00015-1

Информация об авторах

Боровик Анастасия Александровна – мл. науч. сотрудник. Институт экспериментальной ботаники им. В. Ф. Купревича НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: nastyaminskaya37@gmail.com

Небышинец Полина Алексеевна – науч. сотрудник. Институт экспериментальной ботаники им. В. Ф. Купревича НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: polinanebyshinets@yandex.by

Самович Татьяна Викторовна – канд. биол. наук, вед. науч. сотрудник. Институт экспериментальной ботаники им. В. Ф. Купревича НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: samovich77@gmail.com

Ламан Николай Афанасьевич – академик, д-р биол. наук, заведующий лабораторией. Институт экспериментальной ботаники им. В. Ф. Купревича НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: nikolai.laman@gmail.com

Information about the authors

Anastasiya A. Borovik – Junior Researcher. 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: nastyaminskaya37@gmail.com

Polina A. Nebyshinets – Researcher. 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: polinanebyshinets@yandex.by

Tatsiana V. Samovich – Ph. D. (Biol.), Leading Researcher. 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: samovich77@gmail.com

Nikolai A. Laman – Academician, D. Sc. (Biol.), Head of the Laboratory. 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: nikolai.laman@gmail.com

ISSN 1029-8940 (Print)
ISSN 2524-230X (Online)
УДК 630*4:632.934:632.937.14
https://doi.org/10.29235/1029-8940-2026-71-4-300-314

Поступила в редакцию 23.04.2026
Received 23.04.2026

Н. Л. Севницкая[1], В. В. Усеня[1], А. В. Хвасько[2], А. В. Козел[2], Е. А. Тегленков[1], Н. А. Сувалов[1], А. В. Ганебная[2]

[1]Институт леса Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Республика Беларусь
[2]Белорусский государственный технологический университет, Минск, Республика Беларусь

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ БИОЛОГИЧЕСКОГО ПРЕПАРАТА «ИПСБОВЕР» ДЛЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧИСЛЕННОСТИ КОРОЕДОВ В ФОРМИРУЮЩИХСЯ ОЧАГАХ В ХВОЙНЫХ НАСАЖДЕНИЯХ БЕЛАРУСИ И МЕТОДЫ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ

Аннотация. Создан новый отечественный биологический препарат «ИПСБОВЕР» на основе энтомопатогенного гриба *Beauveria bassiana* (Bals.) Vuill., штамм ИЛНАН 20-08, продуцирующего биологически активные вещества, для регулирования численности вершинного, шестизубчатого короедов, короеда-типографа в формирующихся очагах в хвойных насаждениях и защиты от них заготовленной древесины сосны и ели при хранении. Биопрепарат уничтожает стволовых насекомых-вредителей при проникновении гифа гриба через их покровы в результате поражения токсинами, снижает жизнеспособность и плодовитость выживших ксилофагов. В хвойных насаждениях в лесном фонде государственных лесохозяйственных учреждений в 2024–2025 гг. проведены государственные регистрационные испытания биопрепарата «ИПСБОВЕР» по оценке его биологической эффективности. Результаты испытаний в 2024 и 2025 гг. свидетельствуют о том, что биологическая эффективность биопрепарата в формирующихся очагах в хвойных насаждениях при использовании модернизированных феромонных ловушек составила 65,1 и 56,9 % против вершинного короеда, 60,6 и 55,1 % – против шестизубчатого короеда, 62,2 и 56,9 % – против короеда-типографа; при обработке заготовленной древесины сосны – 51,7 и 54,0 % против вершинного короеда, ели – 52,8 и 57,8 % против короеда-типографа.

Проведена государственная регистрация биопрепарата (удостоверение № 7718 о госрегистрации препарата биологического «ИПСБОВЕР» (*Beauveria bassiana* (Bals.) Vuill., штамм ИЛНАН 20-08), № госрегистрации 06-0137 от 17.12.2025). Биопрепарат включен в Дополнение к Государственному реестру средств защиты растений и удобрений, разрешенных к применению на территории Республики Беларусь от 17.12.2025. Разработаны методы применения биопрепарата с использованием модернизированных феромонных ловушек для регулирования численности короедов в формирующихся очагах в хвойных насаждениях и обработки заготовленной древесины сосны и ели от стволовых вредителей при ее хранении.

Ключевые слова: лесной фонд Беларуси, сосновые и еловые насаждения, энтомопатогенный гриб *Beauveria bassiana*, ксилофаги, короед-типограф, вершинный и шестизубчатый короеды, регулирование численности, биологический препарат «ИПСБОВЕР», биологическая эффективность, методы применения биопрепарата

Для цитирования: Оценка эффективности биологического препарата «ИПСБОВЕР» для регулирования численности короедов в формирующихся очагах в хвойных насаждениях Беларуси и методы его применения / Н. Л. Севницкая, В. В. Усеня, А. В. Хвасько [и др.] // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя біялагічных навук. – 2026. – Т. 71, № 4. – С. 300–314. https://doi.org/10.29235/1029-8940-2026-71-4-300-314

Natalia L. Sevnitskaya[1], Vladimir V. Usenya[1], Andrey V. Khvasko[2], Aleksandr V. Kozel[2], Evgeny A. Teglenkov[1], Nikolai A. Suvalov[1], Anastasiya V. Ganebnaya[2]

[1]Institute of Forest of the National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Republic of Belarus
[2]Belarusian State Technological University Minsk, Republic of Belarus

EFFICACY ASSESSMENT OF THE BIOLOGICAL PREPARATION IPSBOVER FOR REGULATING BARK BEETLE POPULATIONS IN EMERGING OUTBREAKS IN CONIFEROUS STANDS OF BELARUS AND METHODS OF ITS APPLICATION

Abstract. The new domestic biological preparation IPSBOVER based on the entomopathogenic fungus *Beauveria bassiana* (Bals.) Vuill., strain ILNAN 20-08, producing biologically active substances, has been created to control populations of *Ips acuminatus*, *Ips sexdentatus*, and *Ips typographus* in the emerging outbreaks of coniferous stands and protect harvested pine and spruce wood from bark beetle damage during storage. The biopreparation eliminates stem insect pests when fungal hyphae penetrate their integuments, resulting in toxin-induced damage. It also reduces the viability and fecundity of surviving xylophages. State registration trials of the biopreparation IPSBOVER were conducted in coniferous stands within the

forest fund of state forestry institutions during 2024–2025 to assess its biological efficacy. Results of state registration trials during 2024–2025 indicate that the biological efficacy of the biopreparation in emerging outbreaks of coniferous stands using modernized pheromone traps was 65.1 % and 56.9 % against *Ips acuminatus*, 60.6 % and 55.1 % against *Ips sexdentatus*, 62.2 % and 56.9 % against *Ips typographus*. When applied to harvested wood, efficacy was 51.7 % and 54.0 % against *Ips acuminatus* on pine and 52.8 % and 57.8 % against *Ips typographus* on spruce.

State registration of the biopreparation IPSBOVER (*Beauveria bassiana* (Bals.) Vuill., strain ILNAN 20-08) has been successfully completed, evidenced by Certificate No. 7718. The state registration number is 06-0137, issued on December 17, 2025. The biopreparation is included in the Addendum to the State register of plant protection products and fertilizers approved for use in the Republic of Belarus dated December 17, 2025. Methods have been developed for the application of the biopreparation using modernized pheromone traps to control bark beetle populations in emerging outbreaks in coniferous stands and to treat harvested pine and spruce wood against stem pests during storage.

Keywords: Belarusian forest fund, pine and spruce stands, entomopathogenic fungus *Beauveria bassiana*, xylophages, *Ips typographus*, *Ips acuminatus*, *Ips sexdentatus*, population control, biological preparation IPSBOVER, biological efficacy, methods of biopreparation application

For citation: Sevnitskaya N. L., Usenya V. V., Khvasko A. V., Kozel A. V., Teglenkov E. A., Suvalov N. A., Ganebnaya A. V. Efficacy assessment of the biological preparation IPSBOVER for regulating bark beetle populations in emerging outbreaks in coniferous stands of Belarus and methods of its application. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya biyalagichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological series*, 2026, vol. 71, no. 4, pp. 300–314 (in Russian). https://doi.org/10.29235/1029-8940-2026-71-4-300-314

Введение. На территории Республики Беларусь в видовом составе лесов преобладают хвойные породы (56,8 %), в том числе сосна обыкновенная **(***Pinus sylvestris* L.) – 47,9 % и ель европейская (*Picea abies* (L.) Karst.) – 8,9 %[1]. На протяжении последних десятилетий в лесном фонде страны отмечено массовое усыхание хвойных насаждений. В числе существующих видов стволовых вредителей в хвойных древостоях наиболее распространены и характеризуются максимальной вредоносностью вершинный (*Ips acuminatus* Gyll.), шестизубчатый (*Ips sexdentatus* Born.) короеды и короед-типограф (*Ips typographus* L.) [1, 2]. По сведениям учреждения «БЕЛЛЕСОЗАЩИТА», в период с 1996 по 2025 г. в порядке проведения сплошных санитарных рубок (ССР) в еловых насаждениях было вырублено 50 млн м^3 древесины. На протяжении 2016–2025 гг. в сосновых насаждениях площадь ССР составила 118 тыс. га[2].

Таким образом, учитывая значительную вредоносность ксилофагов и их повышенную численность в очагах усыхания хвойных насаждений, требуется разработка системы лесозащитных мероприятий по контролю численности и снижению вредоносности короедов в формирующихся очагах сосновых и еловых насаждений.

В хвойных насаждениях Центральной России также наблюдается распространение очагов короеда-типографа, вершинного и шестизубчатого короедов. По данным Ю. И. Гниненко, Н. И. Лямцева, при анализе динамики очагов вершинного короеда установлено, что на территории России они имели существенно более локальный характер распространения по сравнению с Беларусью и другими европейскими странами [3].

В лесах России короед-типограф регистрируется ежегодно. Так, по данным лесопатологического мониторинга, в 2002–2023 гг. данный энтомовредитель зафиксирован в 33 регионах Европейской части России, при этом средняя ежегодная площадь очагов варьировалась от 8 га (Липецкая обл.) до 442,8 тыс. га (Архангельская обл.); более 500 га – в 18 регионах Российской Федерации [4–6].

Имеются сведения [7, 8], что короеды поражаются вирусами, нематодами, простейшими, клещами, энтомофагами (хищниками, паразитами), реже бактериозами, преимущественно – энтомопатогенными грибами, которые давно известны как естественный фактор, ограничивающий численность вредных насекомых. Среди энтомопатогенных грибов *Beauveria bassiana* (Bals.) Vuill. (Ascomycota, Sordariomycetes, Hypocreales, Cordycipitaceae) – один из наиболее распространенных в природе, типичный космополит, вызывающий грибную болезнь – белую мускардину,

[1] Государственный лесной кадастр Республики Беларусь по состоянию на 01.01.2026 г. / М-во лес. хоз-ва Респ. Беларусь. – Мн.: Лесоустр. респ. унитар. предприятие «Белгослес», 2026. – 93 с.

[2] Обзор лесопатологического и санитарного состояния лесного фонда Республики Беларусь за 2025 год и прогноз развития патологических процессов на 2026 год / Государственное учреждение по защите и мониторингу леса «Беллесозащита». – аг. Ждановичи: [б. и.], 2026. – 107 с.

которая поражает большой спектр насекомых (более тысячи видов различных родов, семейств и отрядов).

Наиболее известными на основе энтомопатогенного гриба *Beauveria bassiana* являются микоинсектициды BotaniGard, Mycotrol и Naturalis, выпускаемые в США и Канаде (Organigram Global), чешские препараты Boverol и Boverosil, производящиеся в Бразилии Ballveria, Beauveria JCO, Beauveria WP и др. Во Всероссийском институте защиты растений разработан препарат «Миколар-В» в форме масляной суспензии, успешно прошедший полевые испытания против саранчовых, личинок итальянского пруса и марокканской саранчи в условиях аридных степей Казахстана [9].

В Республике Беларусь микробиологические препараты применяются в недостаточной мере, их долевое участие составляет около 2–3 % от общего объема используемых средств защиты растений. Имеется ряд микробиологических препаратов (биопестицид «Ксантрел, Ж», «Битоксибациллин, П, БА», «Лепидоцид, СК», «Бактоцид, Ж» бактерицидного действия и «МЕЛОБАСС, ПС», «Биоверт, СП», «Энтолек, Ж», «Биослип БВ, Ж» грибного действия) против насекомых-вредителей, разрешенных для применения на территории страны[1].

К настоящему времени в научной литературе имеются противоречивые сведения об эффективности применения биопрепаратов против короедов, разработанных на основе энтомопатогенного гриба *B. bassiana*. Апробация возможности использования опытных образцов способом обработки ловчей древесины проводилась в России Санкт-Петербургской лесотехнической академией и показала отрицательные результаты. В полевых условиях смертность короеда-типографа от грибной инфекции не зарегистрирована [10]. Напротив, в опытах, проведенных Г. И. Плешановой [11], общая смертность инфицированных жуков составила 56 % при обработке споровой суспензией энтомопатогенного гриба *Paecilomyces farinosus* имаго короеда-типографа и отрезков стволов деревьев ели при их заселении короедом.

В Австрии проводились исследования по изучению влияния штаммов *B. bassiana* на жуков шестизубчатого короеда и его энтомофага *Thanasimus formicarius* (Coleoptera: Cleridae). Проведенные эксперименты свидетельствуют о том, что смертность насекомых от споровой суспензии штаммов составила 93,7 % в течение 8 дней при концентрации спор 1×10^6, 1×10^7, при этом гибели его энтомофага не наблюдалось [12].

В опытах, проведенных в Словакии в 2007 г., опрыскивание отрезков стволов деревьев ели, заселенных короедом-типографом, опытными образцами биопрепарата на основе *B. bassiana* обусловило 29 % заражения популяции короеда-типографа данным грибом [13].

В результате трехлетних исследований по применению биопрепаратов (BoVeril, Boverol), проведенных W. Grodzki, не были достигнуты положительные эффекты по ограничению численности короеда-типографа. Выявлен низкий эффект (биологическая эффективность – 30 %) от использования биопрепарата в отношении насекомых (камбио- и ксилофагов, хищников), зимующих в лесной подстилке, и установлен косвенный защитный эффект в виде снижения количества деревьев, заселенных короедами на опытных участках, по сравнению с контрольными древостоями [14].

Результаты полевого эксперимента в Чехии свидетельствуют о высокой эффективности отобранных изолятов грибов *B. bassiana* в снижении численности короеда-типографа способом опрыскивания лесной подстилки приствольных кругов деревьев ели европейской при титре водной суспензии конидий 1×10^7. Установлено, что биологическая активность препаративной формы, включающей альгинат натрия (микрокапсулы), по истечении месяца после обработки существенно выше (90,0–100,0 %) по сравнению с водной суспензией (32,5–40,0 %) [15].

Таким образом, в настоящее время весьма актуальной задачей в области защиты лесов от вредных организмов является разработка эффективного биологического препарата для регулирования численности вершинного и шестизубчатого короедов, короеда-типографа в формирующихся очагах в хвойных насаждениях и методов его применения.

[1] Государственный реестр средств защиты растений и удобрений, разрешенных к применению на территории Республики Беларусь / Гл. гос. инспекция по семеноводству, карантину и защите растений; А. В. Пискун, О. А. Хвалей, С. А. Яблонская. – Мн.: Промкомплекс, 2020. – 742 с.

Объекты и методы исследования. В лесном фонде Двинской экспериментальной лесной базы (ЭЛБ) Института леса НАН Беларуси, Наровлянском спецлесхозе, Чечерском спецлесхозе в апреле – июне 2024–2025 гг. в формирующихся очагах в хвойных насаждениях проведены регистрационные испытания биопрепарата по оценке его биологической эффективности. Выполнена апробация двух методов использования биопрепарата: применение модернизированных феромонных ловушек и опрыскивание заготовленной древесины деревьев хвойных пород.

В хвойных насаждениях на опытных участках устанавливались модернизированные феромонные ловушки на п-образных основах в центре куртины усыхания деревьев таким образом, чтобы приемник ловушки находился на высоте 1–1,3 м от поверхности почвы. В феромонной ловушке на площадку для размещения препарата помещалось по 30 г биопрепарата «ИПСБОВЕР». В качестве средства, привлекающего насекомых в ловушки, использовались диспенсеры, содержащие агрегационные феромонные препараты (для вершинного короеда – «ИПСВАБОЛ В», шестизубчатого короеда – «ИПСВАБОЛ Ш», короеда-типографа – «ИПСВАБОЛ Д»), изготовленные в научно-исследовательской лаборатории элементоорганического синтеза Белорусского государственного университета.

Для наблюдения за динамикой развития вредителей и определения их смертности на опытных участках (около модернизированных феромонных ловушек) и контрольных участках (отсутствие модернизированных феромонных ловушек) выкладывались модельные деревья хвойных пород.

Для защиты древесины хвойных пород от стволовых вредителей проводилась истребительная обработка (двукратно) стволов модельных деревьев (2 м) рабочими растворами биопрепарата (1 % – 8 г/м^2; 2 % – 16 г/м^2) с добавлением Твин-80 (1,3 %) с интервалом 7–14 дней. Норма расхода рабочего раствора составила 0,8 л/м^2. В контрольном варианте опыта древесину опрыскивали водой с добавлением Твин-80 с аналогичной нормой расхода рабочего раствора (0,8 л/м^2). Повторность опытов трехкратная.

Установление биологической эффективности биопрепарата, применяемого с помощью модернизированных феромонных ловушек, проводилось через 2 месяца после их установки в хвойных насаждениях, при опрыскивании – по истечении 7–14 дней после обработки стволов модельных деревьев сосны и ели. Периодически на модельных деревьях отбирались палетки (2–6 шт.) размером 20 × 30 см (вершинный короед, короед-типограф), 20 × 50 см (шестизубчатый короед), на которых учитывалось количество брачных камер, маточных ходов, летных отверстий жуков, куколочных колыбелек короедов и не закончивших развитие молодых жуков.

Определялись следующие популяционные показатели развития стволовых вредителей: плотность поселения, продукция (численность молодого поколения).

Плотность поселения (экз/дм^2) – число поселившихся жуков родительского поколения на единицу поверхности коры. Продукция (экз/дм^2) – численность молодого поколения (куколок, молодых жуков, летных отверстий) на единице поверхности кормового субстрата [16].

Биологическая эффективность биопрепарата определялась по формуле Аббота по снижению численности живых куколок, жуков-короедов на опытных палетках в сравнении с контрольными палетками [17]. Статистический анализ полученных результатов исследований выполнен по общепринятым методикам с использованием пакетов статистического анализа Statistica 6.0. Рассчитан критерий $НСР_{05}$, который определяет минимальную разность между средними значениями в опыте, при превышении которой различие между данными значениями считается статистически значимым [18].

Для проведения регистрационных испытаний биопрепарата в лесном фонде Наровлянского спецлесхоза в сосняках мшистом и черничном (возраст насаждений – 64–79 лет) 4 апреля 2024 г. и Двинской ЭЛБ Института леса НАН Беларуси в ельниках кисличном и орляковом (возраст насаждений – 46–90 лет) 9 апреля 2024 г. установлено по 6 модернизированных феромонных ловушек. В лесном фонде Чечерского спецлесхоза в ельнике кисличном (возраст 100 лет) 3 апреля 2025 г. – 8 модернизированных феромонных ловушек.

Проведены истребительные обработки биопрепаратом древесины модельных деревьев сосны и ели для защиты от стволовых вредителей: 16 и 30 мая 2024 г. – в лесном фонде Наровлянского спецлесхоза и Двинской ЭЛБ Института леса НАН Беларуси, 15 и 29 мая 2025 г. – в лесном фонде

Чечерского спецлесхоза. На каждом участке обработано по 18 м^2 коровой поверхности стволов модельных деревьев сосны и ели.

Результаты и их обсуждение. В лаборатории проблем восстановления, защиты и охраны лесов Института леса НАН Беларуси разработан новый отечественный биологический препарат «ИПСБОВЕР» для регулирования численности вершинного, шестизубчатого короедов, короеда-типографа в формирующихся очагах в хвойных насаждениях и защиты от них заготовленной древесины сосны и ели при хранении. Действующее вещество препарата составляет споровая масса и мицелий энтомопатогенного гриба *B. bassiana* (Bals.) Vuill., штамм ИЛНАН 20-08 и продуцируемые культурой гриба биологически активные вещества. Концентрация жизнеспособных спор *B. bassiana* – не менее 5 млрд/г. Препаративная форма – сыпучая масса (рис. 1).

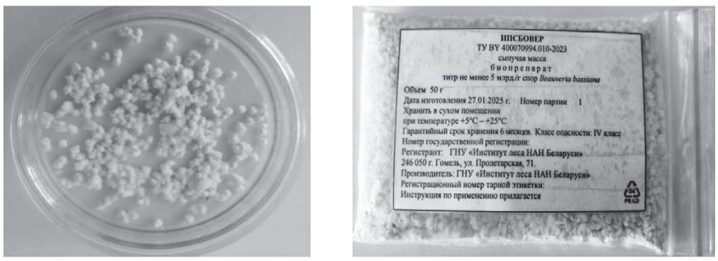


Рис. 1. Опытные образцы биологического препарата «ИПСБОВЕР»

Fig. 1. Experimental samples of the biological preparation IPSBOVER

Источник выделения штамма – лесная подстилка в очаге короеда-типографа в еловом насаждении (Молодечненский лесхоз, Лебедевское лесничество, кв. 163, ельник кисличный).

Штамм зарегистрирован в Генном банке Национального центра биотехнологической информации (NCBI, США) под идентификационным номером FJ 868831. Получен токсикологический паспорт штамма, согласно которому штамм гриба *B. bassiana* (Bals.) Vuill. ИЛНАН 20-08 не обладает патогенными (IV класс опасности), токсигенными и токсическими свойствами и квалифицирован как промышленный штамм микроорганизмов.

Выделенный штамм достаточно стабилен по морфолого-культуральным признакам, является энтомопатогенным, проявляет высокую биологическую активность против имаго короеда-типографа, вершинного и шестизубчатого короедов (100 % смертность на 10-е сутки лабораторных опытов при титре рабочего раствора 1×10^8 спор/мл).

Разработан лабораторный регламент на производство биопрепарата, получено заключение по его токсиколого-гигиенической оценке. Биопрепарат не обладает существенными патогенными, токсическими и раздражающими свойствами (IV класс опасности), однако потенциально аллергоопасен при ингаляционном поступлении в организм, что обосновывает необходимость соблюдения мер профилактики при его производстве и применении. По результатам токсиколого-экологических исследований препарат отнесен к III классу опасности для медоносных пчел (малоопасен).

В результате проведенных исследований разработаны технические условия (ТУ BY 400070994.010-2023) на биологический препарат «ИПСБОВЕР», которые зарегистрированы в БелГИСС (№ 069150 от 22.09.2023); технические условия (ТУ BY 400070994.011-2024) на ловушку феромонную модернизированную, с помощью которой биопрепарат будет вноситься в лесной биоценоз (зарегистрированы в БелГИСС, № 072243 от 05.09.2024).

При проведении регистрационных испытаний биопрепарата было установлено, что жуки короедов активно привлекались в ловушки на агрегационный феромон, ударялись о пластины барьера и попадали на площадку с биопрепаратом, где перемещались по препарату, собирали на свою поверхность значительное количество спор энтомопатогенного гриба *B. bassiana*, а после выползали из ловушки по пологим краям площадки для поиска кормовых деревьев. Вылетевшие жуки внедрялись под кору кормовых деревьев и таким образом заносили споры энтомопатогенного гриба *B. bassiana* в места своего поселения. Энтомопатогенный гриб разрастался на дан-

ных насекомых, инфицировал других особей вредителя и сдерживал их массовое размножение. Биопрепарат поражал насекомых-вредителей при проникновении гифа гриба через их покровы, гибель наступала в результате поражения токсинами. Также биопрепарат снижал жизнеспособность и плодовитость выживших вредителей.

Учет биологической эффективности опытных образцов биопрепарата с применением модернизированных феромонных ловушек был проведен 6 июня в сосновых насаждениях в лесном фонде Наровлянского спецлесхоза и 25–26 июня 2024 г. – в еловых насаждениях в лесном фонде Двинской ЭЛБ Института леса НАН Беларуси, 12–26 июня 2025 г. – в сосновых и еловых насаждениях в лесном фонде Чечерского спецлесхоза на палетках, заложенных на модельных деревьях сосны и ели.

При анализе палеток на модельных деревьях в Наровлянском спецлесхозе и Двинской ЭЛБ Института леса НАН Беларуси определена численность молодого поколения короедов, а также погибших жуков, обросших мицелием со спороношением *Beauveria* sp. (табл. 1).

Таблица 1. **Биологическая эффективность биопрепарата по отношению к короедам при использовании модернизированных феромонных ловушек (Наровлянский спецлесхоз, Двинская ЭЛБ Института леса НАН Беларуси, 2024 г.)**

Table 1. **Biological efficacy of the biopreparation against bark beetles using modernized pheromone traps (Narovlya special forestry, Dvinsk experimental forest station of the Institute of Forest of the NAS of Belarus, 2024)**

Вариант	Численность молодого поколения, экз/дм^2	Биологическая эффективность препарата, %	Количество жуков с *Beauveria* sp., %
Вершинный короед			
Феромонная ловушка	4,88 ± 0,21	65,1 ± 1,33	44,5 ± 0,6
Контроль	14,0 ± 0,18	–	–
$НСР_{05}$	1,49	–	1,41
Шестизубчатый короед			
Феромонная ловушка	3,07 ± 0,14	60,6 ± 2,06	41,8 ± 0,93
Контроль	7,82 ± 0,21	–	–
$НСР_{05}$	0,56	–	2,17
Короед-типограф			
Феромонная ловушка	3,92 ± 0,09	62,2 ± 0,79	52,5 ± 0,85
Контроль	10,39 ± 0,19	–	–
$НСР_{05}$	0,49	–	1,95

Выполненный анализ результатов регистрационных испытаний биологической эффективности биопрепарата «ИПСБОВЕР» свидетельствует о том, что после его однократного применения в модернизированных феромонных ловушках на опытных участках сосновых и еловых насаждений установлено снижение численности молодого поколения вершинного (4,88 экз/дм^2) и шестизубчатого (3,07 экз/дм^2) короедов в 2,9 и 2,5 раза соответственно по сравнению с контрольными участками (14,0 экз/дм^2) и (7,82 экз/дм^2) (табл. 1). Количество погибших жуков вершинного и шестизубчатого короедов, обросших мицелием со спороношением энтомопатогенного гриба *Beauveria* sp., на палетках на опытных участках соснового насаждения составило 44,5 и 41,8 % соответственно (табл. 1). Следовательно, гибель короедов на опытных участках вызвана грибной инфекцией. Биологическая эффективность биопрепарата в период лета и жизнедеятельности вершинного и шестизубчатого короедов составила в среднем 65,1 и 60,6 %.

В результате применения биопрепарата в модернизированных феромонных ловушках на опытных участках елового насаждения в 2,7 раза снизилась численность молодого поколения короеда-типографа (3,92 экз/дм^2) по сравнению с контрольными участками (10,39 экз/дм^2). На опытных участках на палетках отмечены погибшие жуки короеда-типографа (52,5 %) с мицелием энтомопатогенного гриба *Beauveria* sp. Биологическая эффективность биопрепарата составила в среднем 62,2 % (рис. 2).

В Чечерском спецлесхозе при анализе палеток установлена численность молодого поколения стволовых вредителей и жуков, обросших мицелием *Beauveria* sp. (табл. 2).



Рис. 2. Биологическая эффективность биопрепарата «ИПСБОВЕР» против короедов при использовании модернизированных феромонных ловушек в хвойных насаждениях в лесном фонде Наровлянского спецлесхоза и Двинской ЭЛБ Института леса НАН Беларуси

Fig. 2. Biological efficacy of the biopreparation IPSBOVER against bark beetles when using modernized pheromone traps in coniferous stands within the forest fund of the Narovlya special forestry and the Dvinsk experimental forest station of the Institute of Forest of the NAS of Belarus

Таблица 2. **Биологическая эффективность биопрепарата по отношению к короедам при использовании модернизированных феромонных ловушек (Чечерский спецлесхоз, 2025 г.)**

Table 2. **Biological efficacy of the biopreparation against bark beetles using modernized pheromone traps (Chechersk special forestry, 2025)**

Вариант	Численность молодого поколения, экз/дм^2	Биологическая эффективность препарата, %	Количество жуков с *Beauveria* sp., %
Вершинный короед			
Феромонная ловушка	4,7 ± 0,09	56,9 ± 1,19	33,3 ± 0,63
Контроль	10,94 ± 0,14	–	–
$НСР_{05}$	0,41	–	1,53
Шестизубчатый короед			
Феромонная ловушка	1,61 ± 0,22	55,1 ± 3,52	40,8 ± 2,06
Контроль	3,58 ± 0,36	–	–
$НСР_{05}$	1,03	–	5,04
Короед-типограф			
Феромонная ловушка	3,29 ± 0,15	56,9 ± 0,73	48,2 ± 2,19
Контроль	7,64 ± 0,32	–	–
$НСР_{05}$	0,87	–	5,36

Определено, что после однократного применения биопрепарата в модернизированных феромонных ловушках на опытных участках численность молодого поколения вершинного короеда снизилась в 2,3 раза (4,7 экз/дм^2), шестизубчатого короеда – в 2,2 раза (1,61 экз/дм^2), короеда-типографа – в 2,3 раза (3,29 экз/дм^2) по сравнению с контрольными участками хвойных насаждений (10,94 экз/дм^2 – вершинный короед, 3,58 экз/дм^2 – шестизубчатый короед, 7,64 экз/дм^2 – короед-типограф) (табл. 2). На опытных участках хвойных насаждений на палетках отмечены погибшие (33,3–48,2 %) от грибной инфекции жуки короедов, обросшие мицелием со спороношением энтомопатогенного гриба *Beauveria* sp. Биологическая эффективность биопрепарата в период лета и жизнедеятельности короедов составила в среднем 55,1–56,9 % (рис. 3).

Таким образом, установлена высокая биологическая эффективность действия препарата «ИПСБОВЕР» при норме расхода препарата 30 г/1 ловушку/га по отношению к короедам

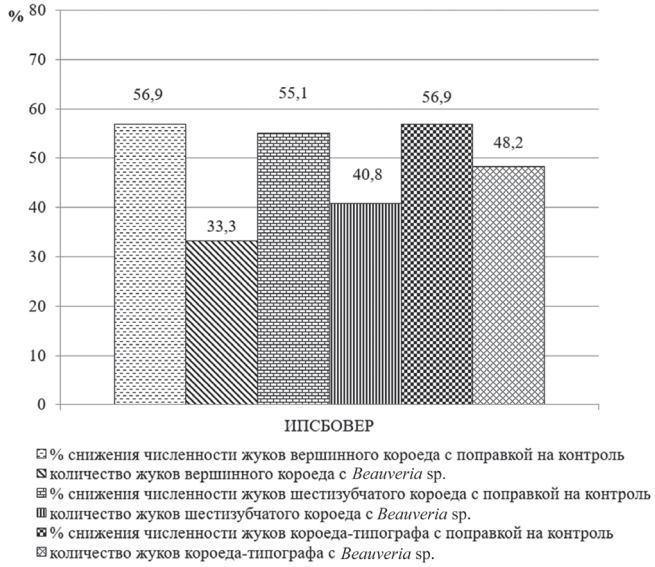


Рис. 3. Биологическая эффективность биопрепарата «ИПСБОВЕР» против короедов при использовании модернизированных феромонных ловушек в хвойных насаждениях в лесном фонде Чечерского спецлесхоза

Fig. 3. Biological efficacy of the biopreparation IPSBOVER against bark beetles when using modernized pheromone traps in coniferous stands within the forest fund of the Chechersk special forestry

(65,1 и 56,9 % – вершинный короед; 60,6 и 55,1 % – шестизубчатый короед; 62,2 и 56,9 % – короед-типограф).

Выкладка ловчей древесины широко применяется в лесном хозяйстве в области лесозащиты для отлова вылетевших из мест зимовки жуков короедов и последующего их уничтожения. Данный способ основан на том, что вырубленная древесина, как и ослабленные под влиянием негативных биотических и абиотических факторов деревья хвойных пород, обладает привлекающей способностью для жуков в связи с выделением живицей а-пинена, являющегося первичным аттрактантом для стволовых вредителей. Для уничтожения отловленных данным способом жуков применяются химические инсектициды, поэтому использование биопрепаратов для этих целей является экологически безопасной альтернативой. Кроме этого, согласно Санитарным правилам[1], в лесах Республики Беларусь, окорке или обработке инсектицидами, или защите другими способами от основных видов ксилофагов подлежит древесина, оставляемая в лесу на хранение (с 1 апреля по 1 сентября) на срок более 20 дней при весенне-летней заготовке или при осенне-зимней к моменту наступления периода лета.

Обработка инсектицидами заготовленной древесины препятствует ее заселению в течение периода лета наиболее опасными видами ксилофагов (конец апреля – август) [19]. Заселенную ловчую древесину и лесопродукцию также необходимо обрабатывать инсектицидами или проводить их окорку в сроки, когда под корой деревьев происходит яйцекладка короедов или появление личинок первых возрастов с целью уничтожения как родительских особей, не успевших покинуть ходы в древесине, так и насекомых, находящихся на отрождающихся преимагинальных стадиях [20].

В Наровлянском спецлесхозе и Двинской ЭЛБ Института леса НАН Беларуси проведена истребительная обработка биопрепаратом «ИПСБОВЕР» заселенных жуками короедов стволов модельных деревьев сосны и ели с целью определения его биологической эффективности (табл. 3).

Выполненный анализ результатов регистрационных испытаний биологической эффективности биопрепарата «ИПСБОВЕР» при двукратной обработке модельных деревьев сосны рабочими растворами препарата в концентрациях 1 и 2 % с нормой расхода 0,8 л/1 м^2 коровой поверхности свидетельствует о снижении численности молодого поколения вершинного короеда

[1] Санитарные правила в лесах Республики Беларусь: утв. постановлением М-ва лес. хоз-ва Респ. Беларусь от 19 дек. 2016 г. № 79 // Национальный реестр правовых актов Республики Беларусь. – 2017. – № 4. – 8/31603.

Таблица 3. **Биологическая эффективность биопрепарата «ИПСБОВЕР» против жуков вершинного короеда и короеда-типографа при обработке модельных деревьев сосны и ели (Наровлянский спецлесхоз, Двинская ЭЛБ Института леса НАН Беларуси, 2024 г.)**

Table 3. **Biological efficacy of the biopreparation IPSBOVER against *Ips acuminatus* and *Ips typographus* during treatment of model pine and spruce trees (Narovlya special forestry, Dvinsk experimental forest station of the Institute of Forest of the NAS of Belarus, 2024)**

Вариант	Концентрация рабочего раствора биопрепарата, %	Численность молодого поколения, экз/дм^2	Биологическая эффективность препарата, %	Количество жуков с *Beauveria* sp., %
Вершинный короед				
ИПСБОВЕР	1,0	6,61 ± 0,22	41,8 ± 1,69	30,1 ± 2,42
ИПСБОВЕР	2,0	5,49 ± 0,12	51,7 ± 0,81	42,7 ± 1,36
Контроль	–	11,36 ± 0,07	–	–
$НСР_{05}$		0,53	–	5,59
Короед-типограф				
ИПСБОВЕР	1,0	5,55 ± 0,28	41,7 ± 2,57	29,5 ± 1,79
ИПСБОВЕР	2,0	4,49 ± 0,1	52,8 ± 0,67	47,8 ± 2,73
Контроль	–	9,52 ± 0,09	–	–
$НСР_{05}$	–	0,61	–	6,61

(6,61 экз/дм^2; 5,49 экз/дм^2) в 1,7 и 2,1 раза соответственно по сравнению с контрольными вариантами (отсутствие обработки) (11,36 экз/дм^2). На опытных вариантах после обработки биопрепаратом модельных деревьев сосны на палетках отмечены погибшие жуки вершинного короеда, покрытые мицелием со спороношением энтомопатогенного гриба *Beauveria* sp. (30,1–42,7 %).

Биологическая эффективность биопрепарата при двукратной обработке модельных деревьев сосны рабочими растворами в концентрациях 1 и 2 % составила в среднем 41,8 и 51,7 % соответственно. С увеличением концентрации выявлено повышение его биологической эффективности на 9,9 % (рис. 4).

При двукратной обработке коровой поверхности стволов модельных деревьев ели рабочими растворами биопрепарата в концентрациях 1 и 2 % численность молодого поколения короеда-типографа (5,55 экз/дм^2; 4,49 экз/дм^2) снизилась в 1,7 и 2,1 раза соответственно по сравнению

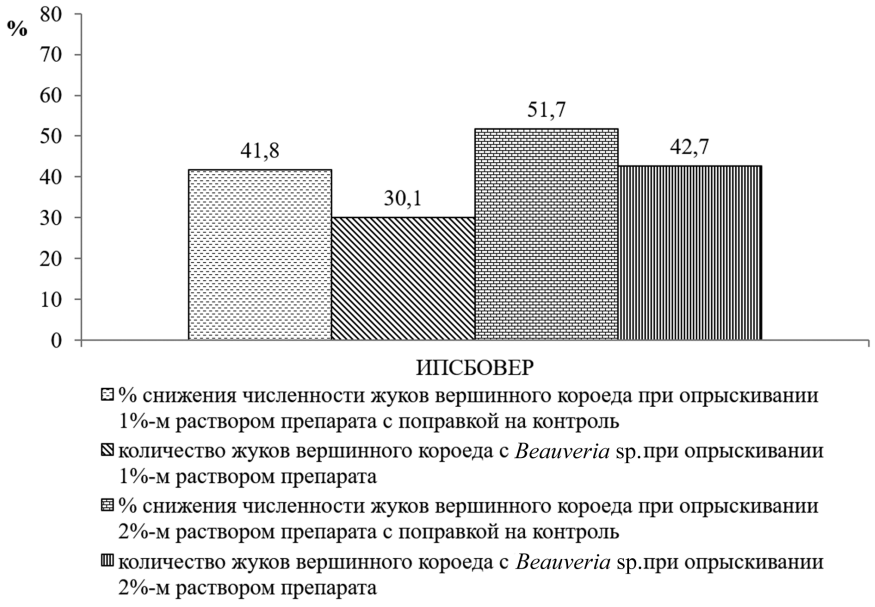


Рис. 4. Биологическая эффективность биопрепарата «ИПСБОВЕР» против жуков вершинного короеда при обработке коровой поверхности стволов модельных деревьев сосны

Fig. 4. Biological efficacy of the biopreparation IPSBOVER against *Ips acuminatus* when applied to the bark surface of model pine tree trunks

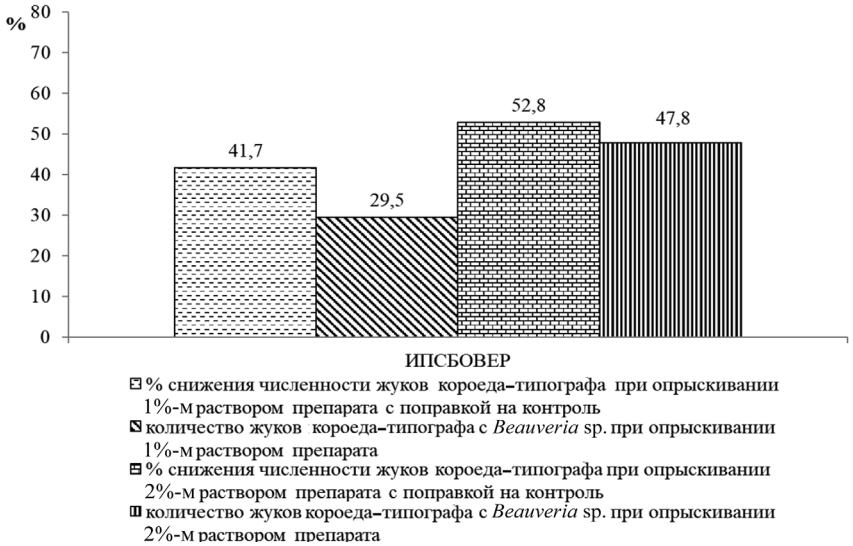


Рис. 5. Биологическая эффективность биопрепарата «ИПСБОВЕР» против жуков короеда-типографа при обработке коровой поверхности стволов модельных деревьев ели

Fig. 5. Biological efficacy of the biopreparation IPSBOVER against *Ips typographus* when applied to the bark surface of model spruce tree trunks

с контрольными вариантами (9,52 экз/дм^2) (табл. 3). На опытных вариантах на палетках погибшие жуки короеда-типографа (29,5–47,8 %) мумифицировались и покрылись мицелиальным налетом со спороношением энтомопатогенного гриба *Beauveria* sp.

Биологическая эффективность биопрепарата при двукратной обработке модельных деревьев ели составила в среднем 41,7 и 52,8 % при концентрациях рабочих растворов биопрепарата 1 и 2 % соответственно. Необходимо отметить, что при увеличении концентрации рабочего раствора отмечено повышение на 11,1 % биологической эффективности биопрепарата (рис. 5).

Установлено, что наиболее эффективным является применение рабочего раствора биопрепарата «ИПСБОВЕР» 2%-й концентрации, так как в этом случае численность молодого поколения вершинного короеда (5,49 экз/дм^2) и короеда-типографа (4,49 экз/дм^2) снижается в 1,2 раза больше по сравнению с вариантом обработки рабочим раствором биопрепарата 1%-й концентрации (6,61 экз/дм^2 – вершинный короед, 5,55 экз/дм^2 – короед-типограф).

Таким образом, установлена высокая биологическая эффективность действия биопрепарата «ИПСБОВЕР» по отношению к вершинному короеду и короеду-типографу (51,7 и 52,8 % соответственно) при 2%-й концентрации рабочего раствора.

Выполнен энтомологический анализ палеток после обработки коровой поверхности стволов модельных деревьев сосны и ели в хвойных насаждениях в лесном фонде Чечерского спецлесхоза (табл. 4).

Таблица 4. **Биологическая эффективность биопрепарата «ИПСБОВЕР» против жуков вершинного короеда и короеда-типографа при обработке модельных деревьев сосны и ели (Чечерский спецлесхоз, 2025 г.)**

Table 4. **Biological efficacy of the biopreparation IPSBOVER against *Ips acuminatus* and *Ips typographus* during treatment of model pine and spruce trees (Chechersk special forestry, 2025)**

Вариант	Концентрация рабочего раствора биопрепарата, %	Численность молодого поколения, экз/дм^2	Биологическая эффективность препарата, %	Количество жуков с *Beauveria* sp., %
Вершинный короед				
ИПСБОВЕР	1,0	4,55 ± 0,19	42,2 ± 1,94	32,9 ± 3,57
ИПСБОВЕР	2,0	3,59 ± 0,2	54,0 ± 4,4	43,6 ± 1,69
Контроль	–	7,89 ± 0,47	–	–
$НСР_{05}$	–	1,1	–	7,89

Окончание табл. 4

Вариант	Концентрация рабочего раствора биопрепарата, %	Численность молодого поколения, экз/дм^2	Биологическая эффективность препарата, %	Количество жуков с *Beauveria* sp., %
Короед-типограф				
ИПСБОВЕР	1,0	14,31 ± 1,22	38,3 ± 2,43	31,1 ± 3,64
ИПСБОВЕР	2,0	9,7 ± 0,43	57,8 ± 3,06	43,1 ± 2,28
Контроль	–	23,43 ± 2,87	–	–
$НСР_{05}$	–	6,29	–	8,56

В результате двукратной обработки коровой поверхности стволов модельных деревьев сосны и ели рабочими растворами биопрепарата в концентрациях 1 и 2 % отмечено снижение численности молодого поколения вершинного короеда (4,55 экз/дм^2; 3,59 экз/дм^2) и короеда-типографа (14,31 экз/дм^2; 9,7 экз/дм^2) в 1,7; 2,2 и 1,6; 2,4 раза соответственно по сравнению с контролем (7,89 экз/дм^2 – вершинный короед, 23,43 экз/дм^2 – короед-типограф). На опытных вариантах после обработки биопрепаратом модельных деревьев сосны выявлена соответственно пораженность погибших жуков вершинного короеда (32,9–43,6 %) и короеда-типографа (31,1–43,1 %) энтомопатогенным грибом *Beauveria* sp. в результате грибной инфекции.

Биологическая эффективность биопрепарата «ИПСБОВЕР» при двукратной обработке модельных деревьев сосны и ели рабочими растворами в концентрациях 1 и 2 % составила в среднем 42,2 и 54,0 %; 38,3 и 57,8 % соответственно (рис. 6, 7).

Установлено, что биологическая эффективность рабочего раствора биопрепарата 2%-й концентрации против вершинного короеда и короеда-типографа выше на 11,8 и 19,5 % соответственно по сравнению с рабочим раствором 1%-й концентрации.

При применении 2%-го рабочего раствора биопрепарата «ИПСБОВЕР» выявлено снижение в 1,3 и 1,5 раза численности молодого поколения вершинного короеда (3,59 экз/дм^2) и короеда-типографа (9,7 экз/дм^2) по сравнению с 1%-м рабочим раствором (4,55 экз/дм^2 – вершинный короед, 14,31 экз/дм^2 – короед-типограф).

Установлена высокая биологическая эффективность биопрепарата «ИПСБОВЕР» против вершинного короеда (54,0 %) и короеда-типографа (57,8 %) при обработке модельных деревьев сосны и ели 2%-м рабочим раствором.

Таким образом, в результате проведенных в 2024–2025 гг. регистрационных испытаний биологическая эффективность биопрепарата «ИПСБОВЕР» с использованием модернизированных феромонных ловушек составила соответственно 65,1 и 56,9 % против вершинного короеда, 60,6 и 55,1 % – против шестизубчатого короеда и 62,2 и 56,9 % – против короеда-типографа.

Биологическая эффективность биопрепарата при обработке 2%-м рабочим раствором коровой поверхности модельных деревьев сосны составила 51,7 и 54,0 % против вершинного короеда, ели – 52,8 и 57,8 % против короеда-типографа.

Проведена государственная регистрация биопрепарата, получено удостоверение № 7718 о государственной регистрации препарата биологического «ИПСБОВЕР» (*B. bassiana* (Bals.) Vuill., штамм ИЛНАН 20-08 (№ госрегистрации 06-0137 от 17.12.2025). Биопрепарат включен в Дополнение к Государственному реестру средств защиты растений и удобрений, разрешенных к применению на территории Республики Беларусь от 17.12.2025.

На основе проведенных регистрационных испытаний и экспериментальной оценки биологической эффективности биопрепарата «ИПСБОВЕР» разработаны методы его применения для регулирования численности короедов в формирующихся очагах в хвойных насаждениях с использованием модернизированных феромонных ловушек и опрыскивания заготовленной и ловчей древесины хвойных пород.

Для регулирования численности короедов в формирующихся очагах в хвойных насаждениях необходимо устанавливать по одной модернизированной феромонной ловушке с биологическим препаратом «ИПСБОВЕР» на 1 га формирующихся очагов стволовых вредителей. Ловушки, снабженные диспенсерами с феромонами вершинного, шестизубчатого короедов, короеда-типографа, размещаются в формирующихся очагах в хвойных насаждениях в начале периода весен-

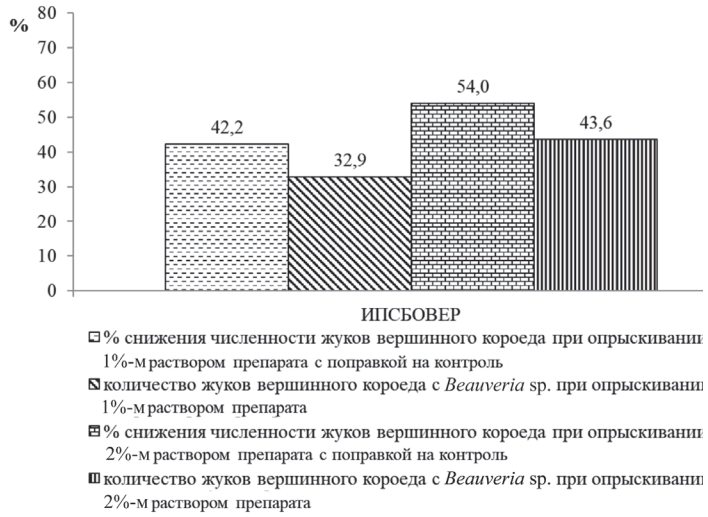


Рис. 6. Биологическая эффективность биопрепарата «ИПСБОВЕР» против жуков вершинного короеда при обработке коровой поверхности стволов модельных деревьев сосны

Fig. 6. Biological efficacy of the biopreparation IPSBOVER against *Ips acuminatus* when applied to the bark surface of model pine tree trunks



Рис. 7. Биологическая эффективность биопрепарата «ИПСБОВЕР» против жуков короеда-типографа при обработке коровой поверхности стволов модельных деревьев ели

Fig. 7. Biological efficacy of the biopreparation IPSBOVER against *Ips typographus* when applied to the bark surface of model spruce tree trunks

ней генерации вредителей (до 10 апреля) в центре куртины усыхания деревьев сосны и ели для привлечения и инфицирования ксилофагов.

На стволах растущих деревьев березы и осины, оказывающих отпугивающее воздействие в отношении короедов, ловушки не вывешиваются. Минимальное расстояние до живых деревьев сосны должно составлять 6 м, ели – 20 м (расстояние не учитывается, когда феромонные ловушки устанавливаются в насаждениях, назначенных для проведения ССР). Феромонные ловушки должны располагаться вертикально и быть зафиксированы боковыми растяжками для предотвращения раскачивания ветром.

В качестве средства, привлекающего короедов в ловушку, используются диспенсеры с феромонными препаратами: для вершинного короеда – «ИПСВАБОЛ В», шестизубчатого короеда – «ИПСВАБОЛ Ш», короеда-типографа – «ИПСВАБОЛ Т», «ИПСВАБОЛ Д». В феромонные ловушки помещается 30 г препарата, которые применяются на протяжении всего периода лёта весенней генерации жуков (3-я декада апреля – 3-я декада июня).

Обработка заготовленной и ловчей древесины хвойных пород от короедов (вершинный короед, короед-типограф) проводится путем опрыскивания 2%-м рабочим раствором биопрепарата «ИПСБОВЕР» при норме расхода 0,8 л/м^2 коровой поверхности стволов модельных деревьев сосны и ели. Обработку заселенной ловчей древесины и лесопродукции рекомендуется проводить в течение периода жизнедеятельности ксилофагов (конец апреля – август) в сроки, когда под корой деревьев происходит яйцекладка короедов или появление личинок первых возрастов с двукратной повторностью с интервалом 7–14 дней, что позволяет уничтожить как родительские особи, не успевшие покинуть ходы, так и насекомых, находящихся на отрождающихся преимагинальных стадиях.

Обработка заготовленной и ловчей заселенной древесины хвойных пород проводится перед вылетом из-под коры молодого поколения вредных насекомых при хранении в лесу или на расстоянии до 0,5 км от хвойных насаждений в период с 1 апреля по 1 сентября на срок более 20 дней согласно Санитарным правилам в лесах Республики Беларусь[1].

Заключение. Для регулирования численности вершинного, шестизубчатого короедов, короеда-типографа в формирующихся очагах в хвойных насаждениях и обработки заготовленной древесины сосны и ели при ее хранении создан новый отечественный биологический препарат «ИПСБОВЕР» на основе энтомопатогенного гриба *B. bassiana* (Bals.) Vuill., штамм ИЛНАН 20-08, продуцирующего биологически активные вещества.

Проведены государственные регистрационные испытания биологического препарата «ИПСБОВЕР» по оценке его биологической эффективности, которая составила 65,1 и 56,9 % против вершинного короеда, 60,6 и 55,1 % – против шестизубчатого короеда, 62,2 и 56,9 % – короеда-типографа при использовании модернизированных феромонных ловушек в формирующихся очагах сосновых и еловых насаждений соответственно, а также 51,7 и 54,0 % – против вершинного короеда и 52,8 и 57,8 % – короеда-типографа при обработке биопрепаратом модельных деревьев сосны и ели соответственно.

Разработаны методы применения биопрепарата для регулирования численности короедов в формирующихся очагах в сосновых и еловых насаждениях с использованием модернизированных феромонных ловушек и обработки заготовленной и ловчей древесины хвойных пород.

Применение биологического препарата «ИПСБОВЕР» в интегрированной системе защиты лесных насаждений от вредных организмов обеспечивает повышение эффективности проведения в них санитарно-оздоровительных мероприятий по снижению численности вершинного и шестизубчатого короедов, короеда-типографа в формирующихся очагах хвойных насаждений и их биологической устойчивости, минимизацию потерь заготовленной древесины хвойных пород.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список использованных источников

1. Динамика плотности популяций короедов (Coleoptera, Scolytidae) в древостоях, ослабленных природными и антропогенными факторами / О. А. Катаев А. В. Осетров, Б. Г. Поповичев, А. В. Селиховкин // Чтения памяти Н. А. Холодковского / Рус. энтомол. о-во; ред. С. Ю. Синев. – СПб., 2021. – Вып. 51. – 82 с.

2. Кухта, В. Н. Сравнительная оценка вредоносности ксилофагов сосны обыкновенной в Беларуси / В. Н. Кухта // Защита растений. – 2024. – № 48. – С. 234–242.

3. Гниненко, Ю. И. Проблема усыхания сосняков и роль вершинного короеда в этом процессе / Ю. И. Гниненко, Н. И. Лямцев // Лесохозяйственная информация. – № 3. – 2022. – С. 84–94.

4. Динамика состояния популяции короеда-типографа в Ленинградской области в очаге массового размножения / А. В. Селиховкин, Б. Г. Поповичев, Т. А. Осечкина [и др.] // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2023. – № 244. – С. 184–199.

5. Лямцев, Н. И. Изменение климата и массовые размножения короеда-типографа в Московском регионе / Н. И. Лямцев, В. М. Сидоренков, Ю. С. Ачиколова // Инновации и технологии в лесном хозяйстве: материалы Всерос. науч.-практ. конф., посвящ. 95-летию С.-Петерб. науч.-исслед. ин-та лес. хоз-ва, Санкт-Петербург, 16–17 мая 2024 г. / Федер. бюджет. учреждение «С.-Петерб. науч.-исслед. ин-т лес. хоз-ва». – СПб., 2024. – С. 198–204.

6. Лямцев, Н. И. Массовые размножения короеда-типографа как фактор деградации темнохвойных лесов / Н. И. Лямцев, В. М. Сидоренков, Ю. С. Ачиколова // Лесохозяйственная информация. – 2025. – № 2. – С. 123–137.

7. Леднев, Г. Р. Возбудители микозов насекомых: пособие по диагностике / Г. Р. Леднев, Б. А. Борисов, Г. В. Митина. – СПб.: ООО «Инновационный центр защиты растений» ВИЗР, 2003. – 78 с.

[1] Санитарные правила в лесах …

8. Крюков, В. Ю. Физиолого-экологические аспекты взаимоотношений между энтомопатогенными грибами (*Ascomycota, Hypocreales*) и насекомыми / В. Ю. Крюков, О. Н. Ярославцева, В. В. Глупова // Паразитология. – 2020. – Т. 54, № 6. – С. 443–469.

9. Артюшкина, Т. В. Инсектицидные препараты на основе энтомопатогенных грибов / Т. В. Артюшкина, А. В. Носова, Ю. А. Рыбаков // Биотехнология. – 2023. – Т. 39, № 6. – С. 97–107.

10. Денисова, Н. В. Опыт применения и оценка эффективности штамма гриба *Beauveria bassiana* Vuill. для контроля численности короеда-типографа / Н. В. Денисова, А. В. Осетров // Система мероприятий по улучшению лесопатологического состояния ельников Европейской части России: тез. докл. науч.-практ. конф., Голицыно, Московская обл., 23–24 апр. 2002 г. / Всерос. науч.-исслед. ин-т лесоводства и механизации лес. хоз-ва. – М., 2002. – С. 38–43.

11. Плешанова, Г. И. Энтомопатогенный гриб *Paecilomyces farinosus* (Dicks.ex. Fr.) Brown. et. Smath. и возможности использования его против вредителей леса: автореф. дис. … канд. биол. наук: 03.096 / Плешанова Галина Ивановна; Иркут. гос. ун-т им. А.А. Жданова. – Иркутск, 1970. – 26 с.

12. Steinwender, B. M. Different effects of the insect pathogenic fungus *Beauveia bassiana* (Deuteromycota) on the bark beetle *Ips sexdentatus* (Coleoptera: Curculionidae) and on its predator *Thanasimus formicarius* (Coleoptera: Cleridae) / B. M. Steinwender, H. W. Krenn, R. Wegensteiner // Journal of Plant Diseases and Protection. – 2010. – Vol. 117, N 1. – P. 33–38. https://doi.org/10.1007/BF03356331

13. Jakus, R. Treatment of bark beetle attacked trees with entomopathogenic fungus *Beauveria bassiana* (Balsamo) Vuillemin / R. Jakus, M. Blazenec // Folia Forestalia Polonica. Series A. Forestry. – 2011. – Vol. 53, N 2. – P. 150–155.

14. Grodzki, W. Proba zastosowania grzyba *Beauveria bassiana* (Bals.) Vuill. w ochronie lasu przed kornikiem drukarzem *Ips typographus* (L.) w warunkach terenowych / W. Grodzki, M. Kosibowicz // Lesne Prace Badawcze. – 2015. – Vol. 76, N 1. – P. 5–17.

15. Абдукерим, Р. Ж. Биологические основы использования энтомопатогенных анаморфных аскомицетов для контроля численности насекомых ксилофагов ели: дис. … д-ра философии: 6D081100 / Абдукерим Рауза Жусипкызы; Казах. нац. аграр. ун-т. – Алматы, 2018. – 119 л.

16. Мозолевская, Е. Г. Методы лесопатологического обследования очагов стволовых вредителей и болезней леса / Е. Г. Мозолевская, О. А. Катаев, Э. С. Соколова. – М.: Лес. пром-сть, 1984. – 152 с.

17. Методические указания по проведению регистрационных испытаний биопрепаратов для защиты растений от вредителей и болезней / Науч.-практ. центр по земледелию, Ин-т защиты растений; сост.: Л. И. Прищепа, Н. И. Микульская, Д. В. Войтка. – Несвиж: Несвиж. укруп. тип. им. С. Будного, 2008. – 56 с.

18. Лакин, Г. Ф. Биометрия: учеб. пособие для биологов спец. вузов / Г. Ф. Лакин. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1980. – 293 с.

19. Кухта, В. Н. Биологическое обоснование мероприятий по контролю численности короедов (*Coleoptera, Scolytidae*) ели европейской: автореф. дис. … канд. с.-х. наук: 06.01.07 / Кухта Валерий Николаевич; Ин-т защиты растений. – Прилуки, 2011. – 22 с.

20. Блинцов, А. И. Рекомендации по регулированию численности и снижению вредоносности стволовых вредителей в хвойных насаждениях / А. И. Блинцов, В. Н. Кухта, А. А. Сазонов // Проблемы лесоведения и лесоводства: сб. науч. тр. / НАН Беларуси, Ин-т леса; отв. ред. В. В. Усеня. – Гомель, 2009. – Вып. 69. – С. 663–674.

References

1. Kataev O. A., Osetrov A. V., Popovichev B. G., Selikhovkin A. V. Dynamics of bark beetle (Coleoptera, Scolytidae) population density in stands weakened by natural and anthropogenic factors. *Readings in memory of Nikolai Aleksandrovich Kholodkovsky*. St. Petersburg, 2001, iss. 54. 82 p. (in Russian).

2. Kukhta V. N. Comparative assessment of the harmfulness of scotts pinexylophages in Belarus. *Zashchita rastenii* [Plant protection], 2024, no. 48, pp. 234–242 (in Russian).

3. Gninenko Yu. I., Lyamtsev N. I. Drying Out of Pine Forests and the Role of the *Ips acuminatus*. *Lesokhozyaistvennaya informatsiya = Forestry information*, 2022, no. 3, pp. 84–94 (in Russian).

4. Selikhovkin A. V., Popovichev B. G., Osechkina T. A., Mamaev N. A., Martirova M. B. Dynamics of the state of the population of the European spruce bark beetle in Leningrad region in the outbreak foci. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoi lesotekhnicheskoi akademii* [News of the St. Petersburg Academy of Forestry], 2023, no. 244, pp. 184–199 (in Russian).

5. Lyamtsev N. I., Sidorenkov V. M., Achikolova Yu. S. Climate change and mass reproduction *Ips typographus* in the Moscow region. *Innovatsii i tekhnologii v lesnom khozyaistve. Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, posvyashchennoi 95-letiyu Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyaistva, Sankt-Peterburg, 16–17 maya 2024 goda* [Innovations and Technologies in Forestry. Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference dedicated to the 95th Anniversary of the St. Petersburg Forestry Research Institute, St. Petersburg, May 16–17, 2024]. St. Petersburg, 2024, pp. 198–204 (in Russian).

6. Lyamtsev N. I., Sidorenkov V. M., Achikolova Yu. S. Bark Beetle Outbreaks as a Factor of Dark Coniferous Forests Degradation. *Lesokhozyaistvennaya informatsiya = Forestry information*, 2025, no. 2, pp. 123–137 (in Russian).

7. Lednev G. R., Borisov B. A., Mitina G. V. *Pathogens of insect mosquitoes: diagnostic manual*. S. Petersburg, LLC "Innovative Center for Plant Protection" VIZR, 2023. 78 p. (in Russian).

8. Kryukov V. Yu., Yaroslavtseva O. N., Glupova V. V. Physiological and ecological aspects of interactions between enthomopathogenic fungi (*Ascomycota, Hypocreales*) and insects. *Parazitologiya* [Parasitology], 2020, vol. 54, no. 6, pp. 443–469 (in Russian).

9. Artyushkina T. V., Nosova A. V., Rybakov Yu. A. Insecticidal preparations based on enteropathogenic fungi. *Biotekhnologiya* [Biotechnology], 2023, vol. 39, no. 6, pp. 97–107 (in Russian).

10. Denisova N. V., Osetrov A. V. Experience with and assessment of the effectiveness of a strain of fungi *Beauveria bassiana* Vuill. to Control *Ips typographus*. *Sistema meropriyatii po uluchsheniyu lesopatologicheskogo sostoyaniya el'nikov*

Evropeiskoi chasti Rossii: tezisy dokladov nauchno-prakticheskoi konferentsii, Golitsyno, Moskovskaya oblast', 23–24 aprelya 2002 goda [A system of measures to highlight the forest pathogenic state of spruce forests in some parts of Russia: abstracts of reports from a scientific and practical conference, Golitsyno, Moscow Region, April 23–24, 2002]. Moscow, 2002, pp. 38–43 (in Russian).

11. Pleshanova G. I. *Entomopathogenic fungi Paecilomyces farinosus (Dicks.ex. Fr.) Brown. et. Smath. and the potential for use against forest pests*. Abstract of Ph. D. diss. Irkutsk, 1970. 26 p. (in Russian).

12. Steinwender B. M., Krenn H. W., Wegensteiner R. Different effects of the insect pathogenic fungus *Beauveia bassiana* (Deuteromycota) on the bark beetle *Ips sexdentatus* (Coleoptera: Curculionidae) and on its predator *Thanasimus formicarius* (Coleoptera: Cleridae). *Journal of Plant Diseases and Protection*, 2010, vol. 117, no. 1, pp. 33–38. https://doi.org/10.1007/BF03356331

13. Jakus R., Blazenec M. Treatment of bark beetle attacked trees with entomopathogenic fungus *Beauveria bassiana* (Balsamo) Vuillemin. *Folia Forestalia Polonica. Series A. Forestry*, 2011, vol. 53, no. 2, pp. 150–155.

14. Grodzki W., Kosibowicz M. Proba zastosowania grzyba *Beauveria bassiana* (Bals.) Vuill. w ochronie lasu przed kornikiem drukarzem *Ips typographus* (L.) w warunkach terenowych. *Lesne Prace Badawcze*, 2015, vol. 76, no. 1, pp. 5–17 (in Polish).

15. Abdukerim R. Zh. *Biological basis for the use of entomopathogenic anamorphic ascomycetes in the control of spruce xylophagous insects.* Ph. D. Thesis. Almaty, 2018. 119 p. (in Russian).

16. Mozolevskaya E. G., Kataev O. A., Sokolova E. S. *Methods of forest pathology survey for stem pests and forest diseases*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1984. 152 p. (in Russian).

17. Prishchepa L. I., Mikul'skaya N. I., Voitka D. V. V. *Methodical instructions for registration tests of biological preparation to protect plants from pests and diseases*. Nesvizh, Nesvizh Large Printing House named after S. Budny, 2008. 56 p. (in Russian).

18. Lakin G. F. *Biometrics*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1980. 293 p. (in Russian).

19. Kukhta V. N. *Biological rationale for the control of the population of bark beetls (Coleoptera, Scolytidae) Pícea ábies*. Abstract of Ph. D. diss. Priluki, 2011. 22 p. (in Russian).

20. Blintsov A. I., Kukhta V. N., Sazonov A. A. Numbers management guidelines and reduced hurtfulness stem pests in conifers stands. *Problemy lesovedeniya i lesovodstva: sbornik nauchnykh trudov* [Problems of forestry and silviculture: a collection of scientific papers]. Gomel, iss. 69, 2009, pp. 663–674 (in Russian).

Информация об авторах

Севницкая Наталья Леонидовна – канд. биол. наук, доцент, заведующий лабораторией. Институт леса НАН Беларуси (ул. Пролетарская, 71, 246050, г. Гомель, Республика Беларусь). E-mail: n.sevnickaja@mail.ru

Усеня Владимир Владимирович – академик, д-р с.-х. наук, профессор, заместитель директора по научной работе. Институт леса НАН Беларуси (ул. Пролетарская, 71, 246050, г. Гомель, Республика Беларусь). E-mail: usenyaforinst@gmail.com

Хвасько Андрей Владимирович – канд. с.-х. наук, доцент, заведующий кафедрой. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: khvasko@belstu.by

Козел Александр Владимирович – канд. с.-х. наук, доцент, доцент кафедры. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: kozel@belstu.by

Тегленков Евгений Алексеевич – науч. сотрудник. Институт леса НАН Беларуси (ул. Пролетарская, 71, 246050, г. Гомель, Республика Беларусь). E-mail: nevtem@mail.ru

Сувалов Николай Алексеевич – мл. науч. сотрудник. Институт леса НАН Беларуси (ул. Пролетарская, 71, 246050, г. Гомель, Республика Беларусь). E-mail: nikolai.suvalov@mail.ru

Ганебная Анастасия Васильевна – магистрант. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: ganebnaaanastasia@gmail.com

Information about the authors

Natalia L. Sevnitskaya – Ph. D. (Biol.), Associate Professor, Head of the Laboratory. Institute of Forest of the National Academy of Sciences of Belarus (71, Proletarskaya Str., 246050, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: n.sevnickaja@mail.ru

Vladimir V. Usenya – Academician, D. Sc. (Agr.), Professor, Deputy Director for Research. Institute of Forest of the National Academy of Sciences of Belarus (71, Proletarskaya Str., 246050, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: usenyaforinst@gmail.com

Andrey V. Khvasko – Ph. D. (Agr.), Associate Professor, Head of the Department. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova Str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: khvasko@belstu.by

Aleksandr V. Kozel – Ph. D. (Agr.), Associate Professor, Associate Professor of the Department. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova Str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kozel@belstu.by

Evgeny A. Teglenkov – Researcher. Institute of Forest of the National Academy of Sciences of Belarus (71, Proletarskaya Str., 246050, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: nevtem@mail.ru

Nikolai A. Suvalov – Junior Researcher. Institute of Forest of the National Academy of Sciences of Belarus (71, Proletarskaya Str., 246050, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: nikolai.suvalov@mail.ru

Anastasiya V. Ganebnaya – Master's Student. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova Str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ganebnaaanastasia@gmail.com

ISSN 1029-8940 (Print)
ISSN 2524-230X (Online)
УДК 630*416:551.583:528.8(476)
https://doi.org/10.29235/1029-8940-2026-71-4-315-331

Поступила в редакцию 13.08.2026
Received 13.08.2026

Н. М. Роговский, Д. Г. Груммо

Институт экспериментальной ботаники имени В. Ф. Купревича Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

ДИНАМИКА УСЫХАНИЯ И УСТОЙЧИВОСТЬ ЛЕСНЫХ НАСАЖДЕНИЙ К КЛИМАТИЧЕСКОМУ СТРЕССУ: ДИСТАНЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ С ПРИМЕНЕНИЕМ АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Аннотация. Представлен комплексный подход к выявлению и пространственно-временной оценке гибели лесов модельных территорий – Национального парка (НП) «Беловежская пуща» и Полесского государственного радиационно-экологического заповедника (ПГРЭЗ). С применением алгоритма Random Forest для классификации снимков Landsat-5/7/8/9 и Sentinel-2 определены площади погибших насаждений за 2001–2025 гг. В НП «Беловежская пуща» процессы гибели лесов имели распространение на 14,9 тыс. га с пиковым периодом в 2016–2018 гг., в ПГРЭЗ – на 16,4 тыс. га с максимумами в 2003–2006, 2011–2013 и 2016–2018 гг. Наиболее сильную корреляционную связь с масштабом гибели лесов показали взвешенные скользящие средние индекса засухи KBDI с лагом 1 год за 2001–2019 гг. (до 0,68 – в НП «Беловежская пуща» и 0,78 – в ПГРЭЗ). В разрезе экологических групп лесов (ЭГЛ) наименее устойчивыми в НП «Беловежская пуща» оказались леса на бедных песчаных почвах недостаточного (гибель на 27,5 % площади ЭГЛ) и неустойчивого (17,9 %) увлажнения , прежде всего сосновые (до 27,4 %), еловые (до 18,3 %) и березовые (до 49,9 %). В ПГРЭЗ наиболее подверженными к гибели являлись сосновые леса на бедных песчаных почвах недостаточного (28,8 %) и неустойчивого (19,2 %) увлажнения . Выявленные закономерности климатической обусловленности масштабов гибели лесов и степень их устойчивости в разрезе ЭГЛ легли в основу подхода к ежегодному прогнозу потенциала развития лесопатологических процессов.

Ключевые слова: лесные экосистемы, заповедные территории, гибель лесов, изменение климата, дистанционное зондирование растительности, машинное обучение, климатические индексы

Для цитирования: Роговский, Н. М. Динамика усыхания и устойчивость лесных насаждений к климатическому стрессу: дистанционный мониторинг с применением алгоритмов машинного обучения / Н. М. Роговский, Д. Г. Груммо // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя біялагічных навук. – 2026. – Т. 71, № 4. – С. 315–331. https://doi.org/10.29235/1029-8940-2026-71-4-315-331

Nikita M. Rogovsky, Dzmitry G. Grummo

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

FOREST LOSS DYNAMICS AND RESILIENCE TO CLIMATE STRESS: A MACHINE LEARNING APPROACH USING REMOTE SENSING DATA

Abstract. The article presents an integrated approach to identifying and spatiotemporally assessing forest loss in the Belovezhskaya Pushcha National Park (NP) and the Polessky State Radioecological Reserve (PSRR). For the period 2001–2025, the Random Forest algorithm identified forest loss in the Belovezhskaya Pushcha NP over more than 14.9 kha with a peak period in 2016–2018, and in the PSRR over an area of 16.4 kha with maximums in 2003–2006, 2011–2013, and 2016–2018. A correlation analysis of annual forest loss values and drought climate indices revealed that the KBDI drought index with a one-year time lag for 2001–2019 had the strongest correlation (up to 0.68 in the Belovezhskaya Pushcha NP and 0.78 in the PSRR). The least resilient forests were those on poor sandy soils with insufficient moisture (27.5 % of the forest ecological group, FEG, area lost) and unstable moisture (17.9 %), in particular pine (up to 27.4 %), spruce (up to 18.3 %) and birch (up to 49.9 %). In the PSRR, the least resilient were pine forests on poor sandy soils with insufficient (28.8 % of the FEG area) and unstable moisture (19.2 %). Based on the identified ecological and climatic patterns of forest loss development, an approach to annual forecasting of the potential for forest pathological processes has been developed.

Keywords: forest ecosystems, protected areas, forest loss, climate change, remote sensing of vegetation, machine learning, climate indices

For citation: Rogovsky N. M., Grummo D. G. Forest loss dynamics and resilience to climate stress: a machine learning approach using remote sensing data. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya biyalagichnykh navuk* =

© Роговский Н. М., Груммо Д. Г., 2026

Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological series, 2026, vol. 71, no. 4, pp. 315–331 (in Russian).
https://doi.org/10.29235/1029-8940-2026-71-4-315-331

Введение. Леса природных территорий со специальным режимом охраны являются репрезентативными полигонами для изучения динамики природных процессов, развитие которых происходит при доминирующем влиянии естественных факторов, один из которых – изменение климата. Рост частоты и продолжительности климатических засух, аномально теплые малоснежные зимы и учащение иных неблагоприятных погодных явлений – все это приводит к понижению устойчивости древостоев к таким прямодействующим негативным факторам, как пожары, ветровалы и активизация жизнедеятельности насекомых-вредителей и патогенов [1–11].

Только за 2001–2020 гг. в Беларуси отмечалась гибель лесов на площади 938,08 тыс. га при росте среднегодового показателя с 36,3 до 83,4 тыс. га/год [12]. Наиболее остро стоит вопрос развития лесопатологических процессов в еловых и сосновых насаждениях. Так, в 2016–2018 гг. в южных регионах Беларуси площадь погибших и вырубленных при санитарных рубках сосновых лесов составила 12,2 тыс. га[1]. За период с 2016 по 2024 г. доля еловых насаждений в республике, погибших от фито- и энтомовредителей, составила около 23,0 % [13].

В текущих условиях становится необходимым оперативное и точное получение пространственных данных гибели лесов для принятия мер по снижению активности негативных процессов в очагах развития и ограничению их распространения в близлежащие лесные массивы. В мировой практике для мониторинга лесных экосистем используются дистанционные методы, преимуществами которых являются: пространственная точность, регулярность обновления и свободный доступ к спутниковым данным [14–21]. Они позволяют выполнять как текущую оценку и ретроспективный анализ гибели лесов, так и разрабатывать на этой основе подходы к прогнозированию лесопатологической угрозы.

Целью работы является создание методики выявления очагов гибели лесов и прогнозирование риска их возникновения с учетом влияния климатических факторов на примере Национального парка (НП) «Беловежская пуща» и Полесского государственного радиационно-экологического заповедника (ПГРЭЗ).

Объекты и методы исследования. Модельными объектами выступают 2 природные территории с существенными ограничениями в ведении хозяйственной деятельности: НП «Беловежская пуща» площадью 150,1 тыс. га и ПГРЭЗ площадью 217,2 тыс. га, расположенные соответственно в юго-западной и юго-восточной частях Беларуси (рис. 1). Лесопокрытые земли занимают значительную долю как в НП «Беловежская пуща» (131,4 тыс. га, 87,4 % всей территории), так и в ПГРЭЗ (165,9 тыс. га, 76,7 %).

Выбор двух объектов исследования объясняется рядом причин:

1. *Генезис природной среды.* Территория НП «Беловежская пуща» обладает многовековым природоохранным режимом и является одним из наиболее сохранившихся природно-растительных комплексов в мире. ПГРЭЗ, наоборот, был организован после аварии на ЧАЭС в 1988 г. на землях, ранее находившихся в хозяйственном пользовании.

Отсюда возникают различия в структуре лесов: насаждения естественного происхождения занимают 105,6 тыс. га (80,3 % лесопокрытых земель) в НП «Беловежская пуща» и 93,6 тыс. га (56,4 %) – в ПГРЭЗ. В свою очередь, перестойные леса занимают 26,0 тыс. га (24,6 % насаждений естественного происхождения) в НП «Беловежская пуща» и 0,1 тыс. га (<0,1 %) – в ПГРЭЗ. Несмотря на это, недавние исследования показали, что ПГРЭЗ имеет основания для присвоения статуса особо охраняемой природной территории (ООПТ) с категорией заповедника, а низкая доля старовозрастных насаждений не может способствовать обратному [22].

[1] Мониторинговые исследования трансформации лесного фонда в результате климатических изменений, антропогенного воздействия и лесохозяйственной деятельности с разработкой предложений по сохранению естественного происхождения насаждений при лесовозобновлении, лесовыращивании и лесопользовании: отчет по мероприятию / Мин-во лесного хоз-ва, Ин-т эксперимент. ботаники НАН Беларуси: рук. В. Г. Шатравко; исполн.: А. В. Пугачевский [и др.]. – Мн., 2019. – 130 с.

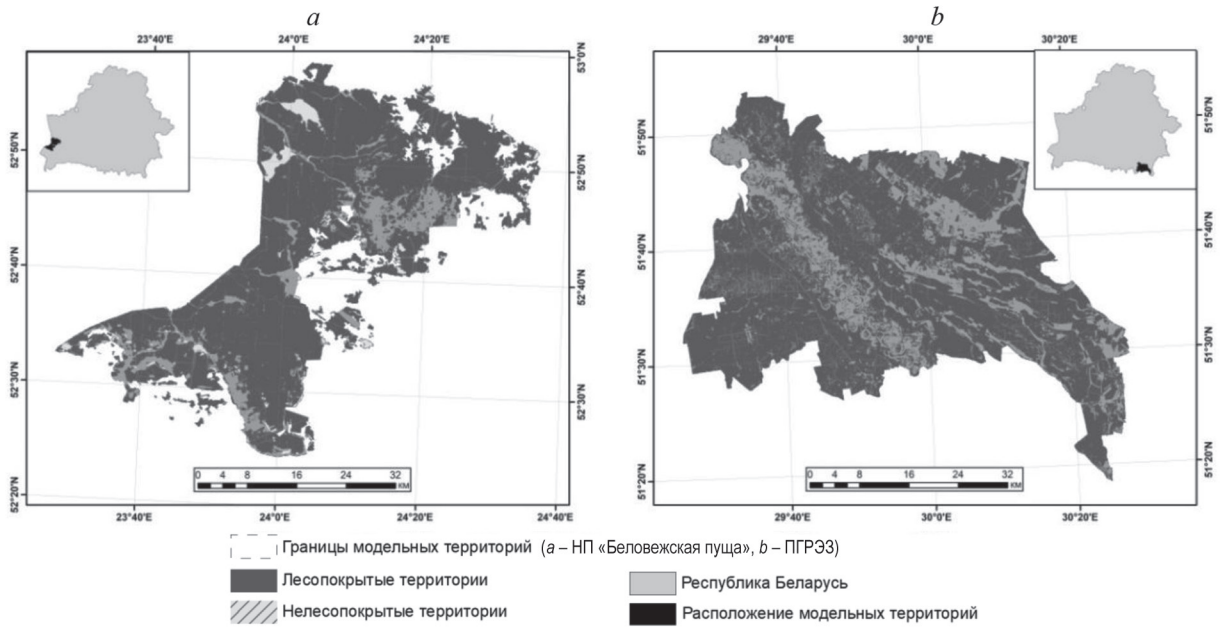


Рис. 1. Модельные территории: *a* – НП «Беловежская пуща, *b* – ПГРЭЗ

Fig. 1. Study sites: *a* – NP “Belovezhskaya Pushcha”, *b* – PSRR

2. *Природные условия и облик растительности.* Индикатором различий природных условий между объектами служит типологическая структура лесов. Для НП «Беловежская пуща» с относительно стабильным гидрологическим режимом, благоприятными климатическими условиями и пестрой почвенной мозаикой характерно преобладание сосновых лесов на бедных песчаных почвах неустойчивого увлажнения (35,2 тыс. га, 26,7 % лесов), на относительно богатых почвах нормального (26,8 тыс. га, 20,4 %) и повышенного (10,5 тыс. га, 8,0 %) увлажнения , черноольшаников – на торфяных эвтрофных болотах (11,9 тыс. га, 9,1 %) и на богатых почвах повышенного увлажнения (9,3 тыс. га, 7,1 %), составляющих 71,5 % всех лесов.

Леса ПГРЭЗ сформировались под воздействием мелиорации и активного лесопользования в доаварийный период на крупных массивах дерново-подзолистых автоморфных и полугидроморфных песчаных почв. Здесь доминируют сосняки на бедных песчаных (55,4 тыс. га, 33,4 %) и относительно богатых почвах (23,8 тыс. га, 14,3 %) и мелколиственные леса – на богатых почвах повышенного увлажнения (25,0 тыс. га, 15,1 %), составляющие суммарно 62,8 % лесов ПГРЭЗ.

3. *Различия в структуре лесов с высоким потенциалом возникновения лесопатологических процессов.* Наибольшему риску гибели подвержены насаждения ели и сосны, однако их соотношение в двух объектах различно. Площадь еловой формации в НП «Беловежская пуща» довольно невелика (5,2 тыс. га, 4,1 % всех лесов), однако распространение насаждений с елью (10–40 % в составе древостоя) значительно шире (44,2 тыс. га, 34,6 %). Леса с участием сосны здесь получили распространение на 90,9 тыс. га (71,5 %). В ПГРЭЗ, напротив, площадь насаждений с елью незначительна (0,2 тыс. га, 0,1 %), а леса с участием или доминированием сосны в составе древостоя расположены на 67,7 тыс. га (40,8 %).

Выявление участков погибших насаждений проводилось с применением алгоритма Random Forest для классификации коллекций спутниковых снимков Landsat-5/7/8/9 и Sentinel-2 [23, 24]. Обученный классификатор позволяет сопоставлять значения отдельных каналов, индексов или их комбинаций на эталонных участках с остальной территорией объекта, формируя пространственную сцену с заданным числом классов.

Пространственная база обучения включала: погибшие насаждения, рубки, стабильные леса, заросли тростника, сельскохозяйственные угодья и иные земли. Контуры эталонных участков получены по результатам наземных обследований и дешифрирования разновременных снимков. Для летнего периода каждого года подбирались снимки с низкой облачностью, а при их отсутствии формировался сезонный композит.

Алгоритм реализован средствами библиотеки scikit-learn с оптимизацией числа решающих деревьев и их глубины во избежание переобучения. Данные разделялись на обучающую (80 %) и тестовую (20 %) выборки для оценки точности модели. Полученные ежегодные сведения элиминировались в случае повторного выявления погибших насаждений в следующий год после первого обнаружения.

Взаимосвязь гибели лесов и засух за 2001–2025 гг. оценивалась с применением интегральных климатических показателей: индекса засухи Китча – Байрама (KBDI) [25], стандартизированного индекса осадков и испарения (SPEI) [26], комплексного гидротермического показателя Битвинскаса [27] и гидротермического коэффициента Селянинова (ГТК) [28].

Индекс KBDI разработан для контроля пожароопасной ситуации и в настоящее время широко применяется в сельском и лесном хозяйстве. Его значения варьируются от 0 до 203,2, где рост отражает увеличение уровня дефицита влаги. В классическом варианте увлажнение грунта учитывается лишь при сумме осадков от 5,1 мм/сут, что в условиях Беларуси завышает значения индекса, поэтому пороговое значение принято равным 1 мм/сут.

Индекс SPEI является усовершенствованным вариантом индекса SPI с учетом вклада температур в оценке засух. Индекс не имеет крайних значений, однако их градация ограничена 7 классами от 2 и более (экстремальное увлажнение) до –2 и менее (экстремальная засуха). В исследовании использовалась динамика SPEI за 3, 6, 9, 12, 24, 36 и 48 месяцев по данным онлайн-ресурса SPEI Global Drought Monitor [29].

Комплексный гидротермический показатель Битвинскаса отражает многолетний ход периодического иссушения, влияющего на формирование годичных колец деревьев. Показатель принимает значения от 0, что соответствует крайне сильному дефициту влаги, и не имеет максимального предела.

Широко на постсоветском пространстве для оценки уровня влагообеспеченности себя зарекомендовал ГТК, применяющийся на различных временных масштабах.

Расчеты значений индексов, за исключением SPEI, производились на платформе Google Earth Engine с использованием ежедневного датасета ERA5, разработанного ECMWF [30]. Помимо расчетов средних значений KBDI и ГТК в течение мая – августа каждого года, определялось их взвешенное скользящее среднее (WMA) за 2, 3 и 4 года.

Климатическая обусловленность гибели лесов оценивалась корреляционным и кросс-корреляционным анализом временных рядов площадей погибших насаждений и климатических индексов с учетом их значения в год («в год») и через год после обнаружения погибших насаждений («+1 год») за периоды 2001–2019 и 2001–2025 гг. Выбор двух интервалов связан с возможным истощением кормовой базы для источников лесопатологических процессов в последние годы [31].

Разнообразие природных условий определяет пространственную дифференциацию лесной растительности и устойчивость насаждений к климатическому стрессу. В работе устойчивость оценивалась через долю площадей погибших насаждений в структуре формаций экологических групп лесов (ЭГЛ) [32, с. 268–270].

На заключительном этапе схема дифференциации лесов по степени устойчивости сопоставлялась с репрезентативным климатическом индексом, что составило основу алгоритма ежегодного прогноза лесопатологической угрозы.

Результаты и их обсуждение. Общая площадь выявленных участков с гибелью лесов составила за 2001–2025 гг. в НП «Беловежская пуща» 14,9 тыс. га, в ПГРЭЗ – 16,4 тыс. га (рис. 2).

Периоды с пиковыми значениями гибели лесов в двух объектах различаются: в НП «Беловежская пуща» они пришлись на 2004–2005 и 2016–2019 гг. (12,8 тыс. га, 85,6 % площади погибших насаждений), в ПГРЭЗ – на 2003–2006, 2011–2013, 2016–2018 гг. (12,2 тыс. га, 74,0 %) (рис. 3).

Анализ климатической обусловленности гибели лесов продемонстрировал связь масштабов явления с рядом индексов засух.

НП «Беловежская пуща». Наибольшую зависимость здесь показал индекс KBDI и его WMA с временным лагом в +1 год (табл. 1). Максимальное значение KBDI отмечено в 2015 г. (48,5 единиц), а в последующие сезоны наблюдалась самая масштабная за весь анализируемый период гибель лесов. Иные индексы устойчивых корреляционных связей не показали.

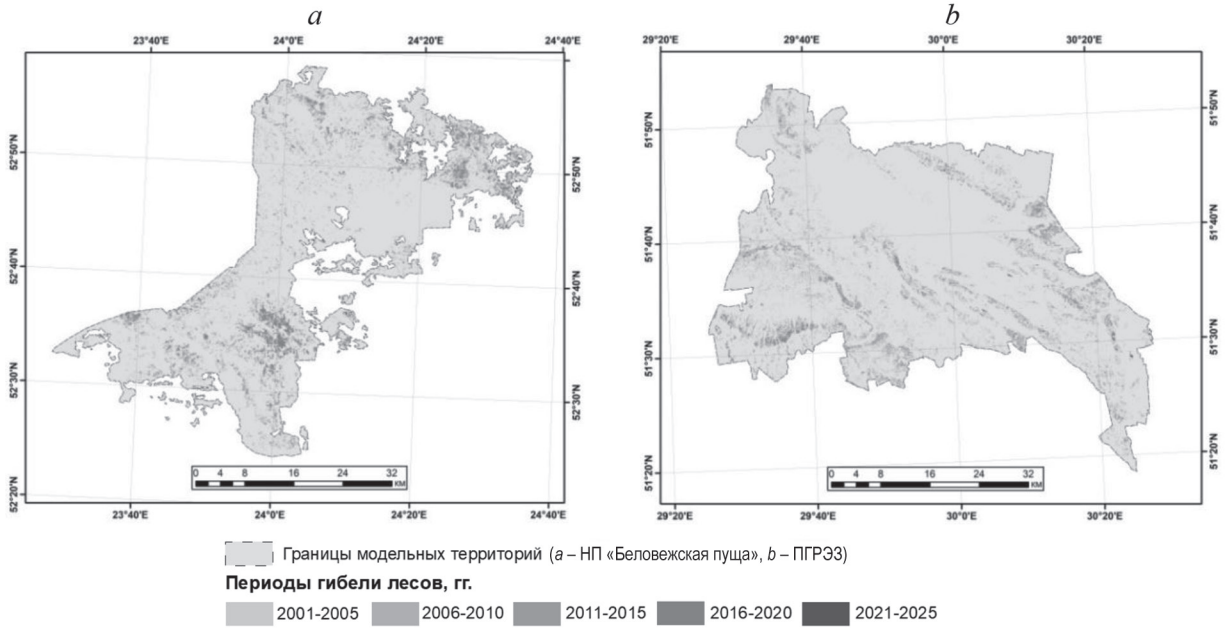


Рис. 2. Гибель лесов в НП «Беловежская пуща» (*a*) и ПГРЭЗ (*b*) за 2001–2025 гг.

Fig. 2. Forest loss in the NP "Belovezhskaya Pushcha" (*a*) and the PSRR (*b*) in 2001–2025

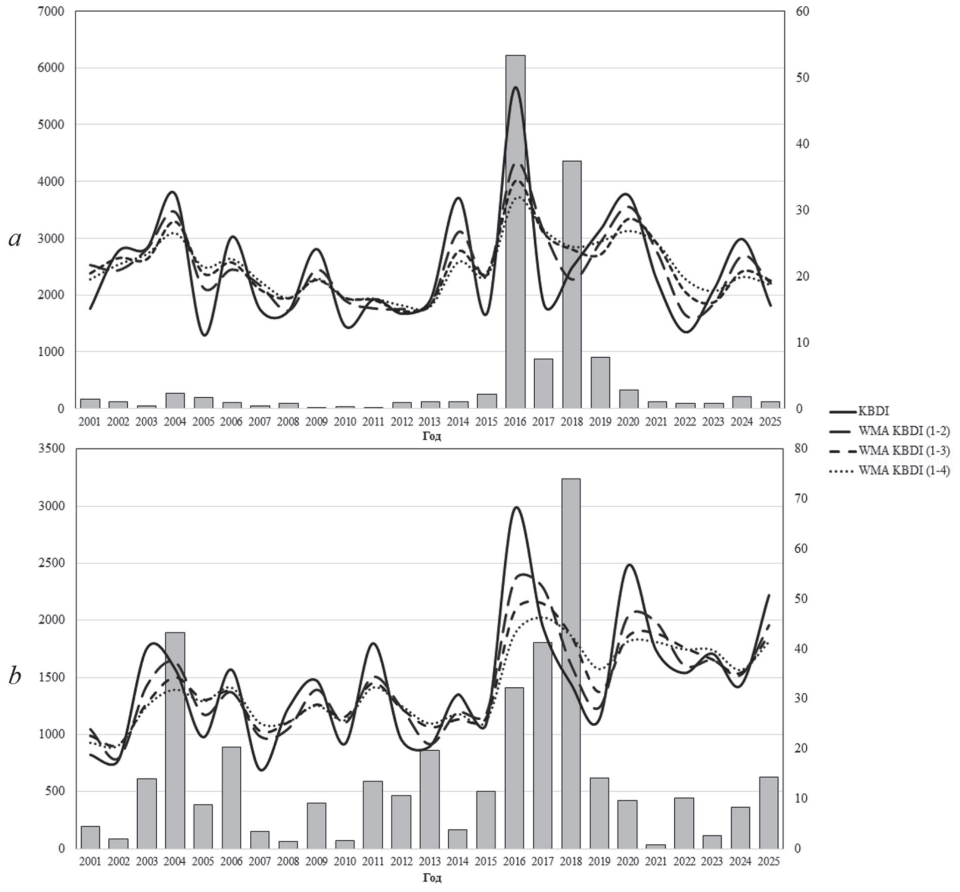


Рис. 3. Динамика площади погибших насаждений и климатических индексов (смещение +1 год):
a – НП «Беловежская пуща», *b* – ПГРЭЗ

Fig. 3. Dynamics of the area of dying forest stand area and climate indices (+1 year):
a – NP "Belovezhskaya Pushcha", *b* – PSRR

Таблица 1. **Коэффициенты корреляции значений площадей усыханий и индексов**

Table 1. **Correlation coefficients between the values of drying areas and climate indices**

Объект	Индекс	Площадь усыханий							
		2001–2025 гг.				2001–2019 гг.			
		+1 год		в год		+1 год		в год	
		r	*p*-value	*r*	*p*-value	*r*	*p*-value	*r*	*p*-value
НП «Беловежская пуща»	KBDI	**0,57**	**<0,01**	0,02	0,94	**0,61**	**<0,01**	–0,02	0,92
	$WMA_{KBDI\ (1-2)}$	**0,51**	**<0,01**	0,30	0,14	**0,56**	**0,01**	0,28	0,24
	$WMA_{KBDI\ (1-3)}$	**0,61**	**<0,01**	0,32	0,12	**0,68**	**<0,01**	0,30	0,21
	$WMA_{KBDI\ (1-4)}$	**0,60**	**<0,01**	0,43	0,03	**0,66**	**<0,01**	0,42	0,08
	$SPEI_3$	–0,39	0,06	–0,03	0,90	–0,47	0,04	–0,04	0,85
	$SPEI_6$	–0,08	0,07	–0,08	0,72	–0,14	0,58	–0,14	0,58
	$SPEI_{12}$	–0,04	0,09	0,04	0,85	–0,08	0,74	0,03	0,90
	$SPEI_{24}$	–0,01	0,95	0,01	0,96	–0,07	0,79	0,00	1,0
	$SPEI_{36}$	0,02	0,93	0,02	0,91	–0,04	0,88	0,00	1,0
	$SPEI_{48}$	–0,03	0,89	0,03	0,88	–0,08	0,73	–0,01	0,98
	Б	–0,08	0,22	0,10	0,63	–0,07	0,78	0,14	0,57
	ГТК	–0,25	0,36	–0,18	0,40	–0,28	0,24	–0,18	0,46
	$WMA_{ГТК\ (1-2)}$	–0,19	0,44	–0,28	0,17	–0,21	0,38	–0,31	0,19
	$WMA_{ГТК\ (1-3)}$	–0,16	0,44	–0,28	0,18	–0,17	0,48	–0,30	0,21
	$WMA_{ГТК\ (1-4)}$	–0,14	0,50	–0,26	0,20	–0,13	0,59	–0,26	0,28
ПГРЭЗ	KBDI	0,30	0,14	–0,15	0,49	0,47	0,04	–0,12	0,63
	$WMA_{KBDI\ (1-2)}$	**0,41**	**0,04**	0,00	0,98	**0,65**	**<0,01**	0,09	0,71
	$WMA_{KBDI\ (1-3)}$	**0,50**	**0,01**	0,13	0,53	**0,78**	**<0,01**	0,28	0,25
	$WMA_{KBDI\ (1-4)}$	**0,47**	**0,02**	0,24	0,25	**0,78**	**<0,01**	0,43	0,07
	$SPEI_3$	–0,18	0,39	0,12	0,56	–0,34	0,16	0,05	0,83
	$SPEI_6$	–0,02	0,91	–0,08	0,70	–0,12	0,62	–0,20	0,42
	$SPEI_{12}$	–0,04	0,83	–0,04	0,86	–0,12	0,63	–0,04	0,86
	$SPEI_{24}$	–0,14	0,51	–0,05	0,81	–0,32	0,18	–0,10	0,68
	$SPEI_{36}$	–0,21	0,32	–0,11	0,61	**–0,64**	**<0,01**	–0,29	0,23
	$SPEI_{48}$	–0,22	0,30	–0,22	0,29	**–0,73**	**<0,01**	**–0,57**	**0,01**
	Б	**–0,45**	**0,02**	–0,16	0,43	**–0,64**	**<0,01**	–0,22	0,36
	ГТК	**–0,35**	**<0,01**	–0,08	0,71	–0,44	0,06	–0,09	0,72
	$WMA_{ГТК\ (1-2)}$	**–0,46**	**0,02**	–0,21	0,30	**–0,62**	**<0,01**	–0,26	0,29
	$WMA_{ГТК\ (1-3)}$	**–0,54**	**<0,01**	–0,34	0,10	**–0,71**	**<0,01**	–0,41	0,09
	$WMA_{ГТК\ (1-4)}$	**–0,53**	**<0,01**	–0,43	0,03	**–0,71**	**<0,01**	**–0,50**	**0,03**

Примечание. Полужирным начертанием обозначены статистически значимые корреляционные связи (*p*-value < 0,05).

Более сильная зависимость отмечается для периода 2001–2019 гг., где коэффициент корреляции достигал 0,68 (KBDI, $WMA_{KBDI\ (1-3)}$) на следующий год после засухи. Это связано с тем, что после массовой гибели древостоя в 2016–2018 гг. кормовая база для насекомых и патогенных грибов не успела восстановиться. Также сказались проводимые санитарные мероприятия по борьбе с источниками ослабления состояния древостоя. В результате этого в последующем наблюдалось снижение масштабов гибели лесов, несмотря на высокие значения KBDI.

ПГРЭЗ. В заповеднике сильную корреляционную связь с площадью погибших насаждений показали все вариации WMA индекса KBDI и ГТК, а также значения SPEI за 36 и 48 месяцев и комплексного гидротермического показателя Битвинскаса. Максимальные значения коэффициента корреляции отмечены для $WMA_{KBDI\ (1-3)}$ и $WMA_{KBDI\ (1-4)}$ – по 0,78.

Характер засух и масштабы гибели лесов в ПГРЭЗ отличаются от НП «Беловежская пуща». Максимальное среднесезонное значение KBDI (68,0 единиц) отмечено в 2015 г., что соответствует

сильному уровню засухи при пороге «эффективных осадков» в 1 мм/сут. В ПГРЭЗ значения индекса были высоки и в 2016 г., что повлияло на усиление негативного воздействия недостатка влаги и продолжение развития лесопатологических процессов вплоть до 2019 г. По аналогичному сценарию наблюдались потери лесов в 2003–2004 гг. на фоне двух подряд летних сезонов 2002–2003 гг. с засухами. По этой же причине отличается динамика площадей погибших насаждений двух модельных территорий, где пик в НП «Беловежская пуща» относится к 2016 г., а в ПГРЭЗ – к 2018 г.

Взвешенное скользящее среднее KBDI за 3 года показало наилучший результат на обеих территориях, что делает его наиболее пригодным для прогнозирования риска гибели лесов.

Анализ устойчивости лесов. При близкой климатической обусловленности гибели различия в генезисе и структуре лесов отражаются в распределении погибших насаждений по ЭГЛ.

НП «Беловежская пуща». Основные очаги гибели лесов располагаются в северо- и юго-восточной частях объекта (рис. 2, *а*), сконцентрировавшись на бедных дерново-подзолистых песчаных и супесчаных почвах водно-ледниковых возвышенностей сожского возраста. В разрезе функционального зонирования участки погибших насаждений распределяются неравномерно: большая часть (5,9 тыс. га, 39,7 % всей гибели лесов) находится в заповедной зоне, самой крупной структурной единице объекта (58,3 тыс. га); на хозяйственную зону (45,9 тыс. га) приходится 4,8 тыс. га (32,0 %) погибших насаждений, на зону регулируемого использования (37,9 тыс. га) и рекреационную зону (8,0 тыс. га) – 3,1 (20,9 %) и 1,0 тыс. га (6,5 %) соответственно. Сильная степень подверженности древостоя в заповедной зоне объясняется наличием в ее пределах территорий, ранее входивших в заповедно-охотничью хозчасть [33, с. 8], где и сконцентрированы основные очаги. На остальной ее площади, длительно находившейся в абсолютно заповедном режиме, нарушенные леса встречаются лишь небольшими фрагментами.

Наибольшие площади погибших насаждений за анализируемый период были характерны для лесов, произрастающих на бедных и относительно богатых песчаных почвах (суммарно – 12,4 тыс. га, 94,4 % потерь лесов) (табл. 2, рис. 4).

По отношению к гигротопам явление получило обширное распространение в лесах на почвах неустойчивого и нормального увлажнения (11,8 тыс. га, 78,8 %).

В структуре формаций ЭГЛ наиболее сильно негативное воздействие внешних факторов проявилось в сосновых лесах, в особенности на бедных песчаных почвах неустойчивого увлажнения и относительно богатых почвах нормального увлажнения (10,5 тыс. га, 70,6 %). Помимо этого, явление получило распространение в еловых и березовых лесах, в большей степени – на относительно богатых почвах нормального и повышенного увлажнения (1,0 тыс. га, 6,6 %). Преобладание указанных групп и формаций связано прежде всего с их обширной представленностью, тогда как реакция на изменение состояния среды существенно различается.

Наиболее уязвимыми в НП «Беловежская пуща» за 2001–2025 гг. оказались леса на бедных песчаных почвах недостаточного (27,5 % площади ЭГЛ) и неустойчивого (17,9 %) увлажнения, относительно богатых почвах нормального (12,1 %) и повышенного (12,0 %) увлажнения. Менее уязвимыми оказались леса на более богатых и увлажненных почвах, где доля погибших насаждений составила от 1,5 до 2,8 % от площади ЭГЛ.

Среди формаций с низкой устойчивостью к климатическому стрессу выделяются сосновые леса, где доля погибших насаждений снижается с ростом богатства и увлажненности почв: от 27,4 % на бедных песчаных почвах недостаточного увлажнения до 2,7% на олиго- и мезотрофных болотах.

Для еловых лесов зависимость между устойчивостью к негативному воздействию и условиями местопроизрастания выражена в меньшей степени. Здесь погибшие насаждения составили от 6,2 % площади формации на оторфованных минеральных почвах эвтрофного заболачивания до 18,3 % на бедных песчаных почвах неустойчивого увлажнения.

Березовые леса подвержены гибели главным образом на бедных песчаных почвах, где погибшие насаждения составляют до половины площади в ряде ЭГЛ. Прежде всего это связано с общей малой представленностью березовых лесов в таких местообитаниях и весомой долей насаждений с низкоустойчивым древостоем сосны (55,6 %).

Промежуточное положение в устойчивости к лесопатологической угрозе занимают в основном лиственные леса на относительно богатых почвах нормального и повышенного увлажнения, где наиболее широко представлены формации дуба, березы и осины.

Таблица. 2. **Характеристика гибели лесов в разрезе пород различных ЭГЛ**

Table 2. **Characteristics of forest loss in terms of species of various forest ecological groups**

ЭГЛ			Формация	Характеристики ЭГЛ							
				НП «Беловежская пуща»				ПГРЭЗ			
				площадь ЭГЛ, тыс. га	гибель леса, тыс. га	доля погибших насаждений в ЭГЛ, %	доля погибших насаждений от всех лесов, %	площадь ЭГЛ, тыс. га	гибель леса, тыс. га	доля погибших насаждений в ЭГЛ, %	доля погибших насаждений от всех лесов, %
на бедных песчаных почвах	недостаточного увлажнения	1	С	2,3	0,6	27,4	4,3	17,5	5,1	28,8	30,8
			Б	<0,1	<0,1	49,9	0,1	1,0	0,2	17,4	1,1
			Итого по 1	2,4	0,7	27,5	4,4	18,6	5,2	28,2	31,8
	неустойчивого увлажнения	2	С	35,2	6,3	18,0	42,4	37,9	7,3	19,2	44,5
			Е	0,3	0,1	18,3	0,3	<0,1	<0,1	0,6	<0,1
			Д	<0,1	<0,1	1,2	<0,1	–	–	–	–
			Б	0,9	0,1	15,7	1,0	1,9	0,2	12,2	1,4
			ОС	<0,1	<0,1	4,6	<0,1	<0,1	<0,1	0,5	<0,1
			Итого по 2	36,4	6,5	17,9	43,7	39,9	7,5	18,9	45,8
на относительно богатых почвах	нормального увлажнения	3	С	26,8	4,2	15,7	28,2	13,3	0,6	4,6	3,7
			Е	2,7	0,4	13,5	2,4	<0,1	<0,1	0,1	<0,1
			Д	4,8	0,2	4,6	1,5	6,5	0,1	1,6	0,6
			Г	1,4	<0,1	2,4	0,2	0,3	<0,1	0,1	<0,1
			КЛ	0,1	<0,1	1,8	<0,1	0,2	<0,1	<0,1	<0,1
			ЛП	<0,1	<0,1	9,6	<0,1	–	–	–	–
			Я	<0,1	<0,1	1,8	<0,1	0,3	<0,1	0,4	<0,1
			ОЛЧ	0,9	<0,1	3,1	0,2	0,8	<0,1	1,0	<0,1
			Б	5,2	0,3	5,9	2,1	5,0	0,2	3,1	0,9
			ОС	1,2	0,1	4,6	0,4	0,2	<0,1	0,9	<0,1
			ИВД	–	–	–	–	<0,1	<0,1	1,3	<0,1
			Итого по 3	43,3	5,2	12,1	35,0	27,1	0,9	3,3	5,5
	повышенного увлажнения	4	С	10,5	1,4	12,9	9,1	10,5	0,8	7,8	5,0
			Е	1,4	0,2	16,4	1,5	–	–	–	–
			Д	0,3	<0,1	4,3	0,1	0,9	<0,1	1,2	0,1
			Г	<0,1	<0,1	4,5	<0,1	–	–	–	–
			Б	1,7	0,1	5,2	0,6	10,6	0,6	5,9	3,9
			ОС	0,2	<0,1	4,3	0,1	0,1	<0,1	2,4	<0,1
			Итого по 4	14,1	1,7	12,0	11,3	22,4	1,5	6,6	9,0
на богатых почвах повышенного увлажнения		5	Е	0,9	0,1	8,2	0,5	–	–	–	–
			Д	0,4	<0,1	2,5	0,1	11,1	0,1	1,2	0,8
			Г	<0,1	<0,1	0,2	<0,1	–	–	–	–
			КЛ	<0,1	<0,1	2,5	<0,1	–	–	–	–
			Я	0,2	<0,1	1,6	<0,1	0,9	<0,1	0,3	<0,1
			ОЛЧ	9,3	0,2	1,9	1,2	10,4	0,1	0,9	0,5
			Б	1,9	<0,1	1,3	0,2	13,9	0,4	2,5	2,2
			ОС	0,1	<0,1	2,6	<0,1	0,3	<0,1	0,2	<0,1
			ИВК	–	–	–	–	<0,1	<0,1	2,5	<0,1
			ИВД	–	–	–	–	1,0	<0,1	2,3	0,1
			Итого по 5	12,9	0,3	2,2	1,9	37,7	0,6	1,6	3,7

на оторфованных минеральных почвах	олиготрофного заболачивания	6	С	1,7	0,2	10,4	1,2	0,5	<0,1	7,0	0,2
			Е	0,1	<0,1	11,8	0,1	–	–	–	–
			Б	0,6	<0,1	2,9	0,1	0,8	0,1	8,2	0,4
			ОС	<0,1	<0,1	0,2	<0,1	<0,1	<0,1	0,4	<0,1
			Итого по 6	2,5	0,2	8,6	1,4	1,4	0,1	7,6	0,6
	эвтрофного заболачивания	7	С	0,4	<0,1	4,6	0,1	0,1	<0,1	7,7	0,1
			Е	0,1	<0,1	6,2	<0,1	–	–	–	–
			ОЛЧ	<0,1	<0,1	1,1	<0,1	–	–	–	–
			Б	0,5	<0,1	0,8	<0,1	1,4	<0,1	3,2	0,3
			Итого по 7	1,0	<0,1	2,8	0,2	1,5	<0,1	3,6	0,3
на торфяных болотах	олиго- и мезотрофных	8	С	1,8	<0,1	2,7	0,3	–	–	–	–
			Б	0,3	<0,1	1,3	<0,1	–	–	–	–
			Итого по 8	2,1	0,1	2,6	0,4	–	–	–	–
	эвтрофных	9	С	0,9	<0,1	2,8	0,2	<0,1	<0,1	2,6	<0,1
			Е	0,1	<0,1	12,4	0,1	–	–	–	–
			Я	<0,1	<0,1	6,5	<0,1	–	–	–	–
			ОЛЧ	11,9	0,2	1,5	1,2	5,0	0,1	2,1	<0,1
			Б	3,7	<0,1	0,9	0,2	2,3	0,1	3,9	0,5
			ИВД	–	–	–	–	0,9	<0,1	3,7	0,2
			ИВК	0,1	<0,1	0,2	<0,1	4,9	0,1	2,2	0,7
			Итого по 9	16,8	0,2	1,5	1,6	13,0	0,3	2,6	2,0
на затапливаемых землях		10	Д	–	–	–	–	3,3	0,1	4,2	0,8
			ИВК	–	–	–	1,0	<0,1	5,6	0,3	
			Итого по 10	–	–	–	4,2	0,2	4,5	1,2	
Итого по всем ЭГЛ				131,4	14,9	11,4	100,0	165,9	16,4	9,9	100,0

Примечание. Формации древесных пород: С – сосновая, Е – еловая, Д – дубовая, Г – грабовая, КЛ – кленовая, ЛП – липовая, Я – ясеневая, ОЛЧ – черноольховая, Б – березовая, ОС – осиновая, ИВК – ивы кустарниковой, ИВД – ивы древовидной.

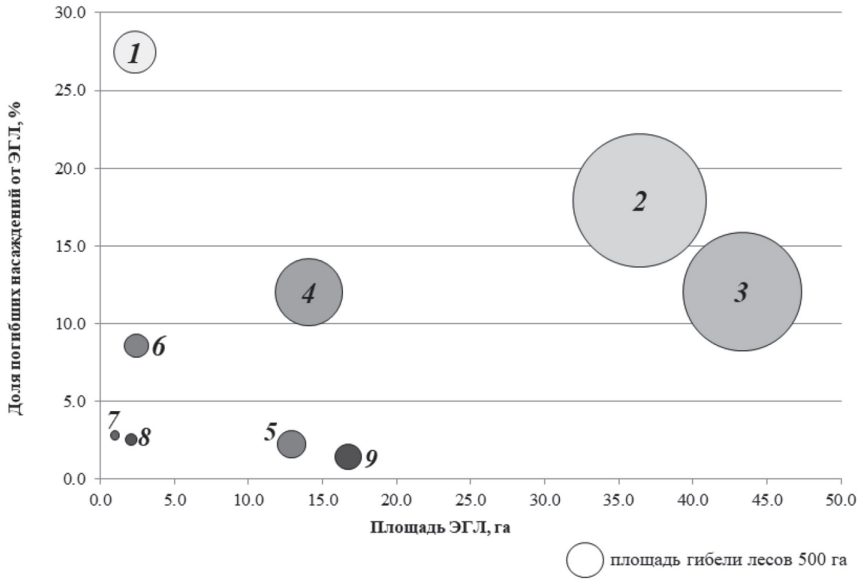


Рис. 4. Соотношение доли погибших насаждений в ЭГЛ с ее общей площадью в НП «Беловежская пуща» (номера ЭГЛ – в табл. 2)

Fig. 4. The ratio of the proportion of dying forest stands in the forest ecological groups to its total area in the NP "Belovezhskaya Pushcha" (forest ecological groups' numbers are given in Table 2)

Леса на болотах и оторфованных минеральных почвах различных типов заболачивания являются наименее уязвимыми к воздействию экстремальных климатических явлений. Доминирующее положение в данных ЭГЛ занимают формации ольхи черной и березы. Для них характерна низкая доля погибших насаждений в структуре лесов (от 0,8 до 2,9 %) при довольно широком распространении в НП «Беловежская пуща» (17,1 тыс. га).

ПГРЭЗ. Здесь подавляющая доля погибших насаждений разместилась крупными массивами по периферии и в центре территории (рис. 2, *b*), в основном на бедных песчаных почвах недостаточного и неустойчивого увлажнения (12,7 тыс. га, 77,6 %) (рис. 5).

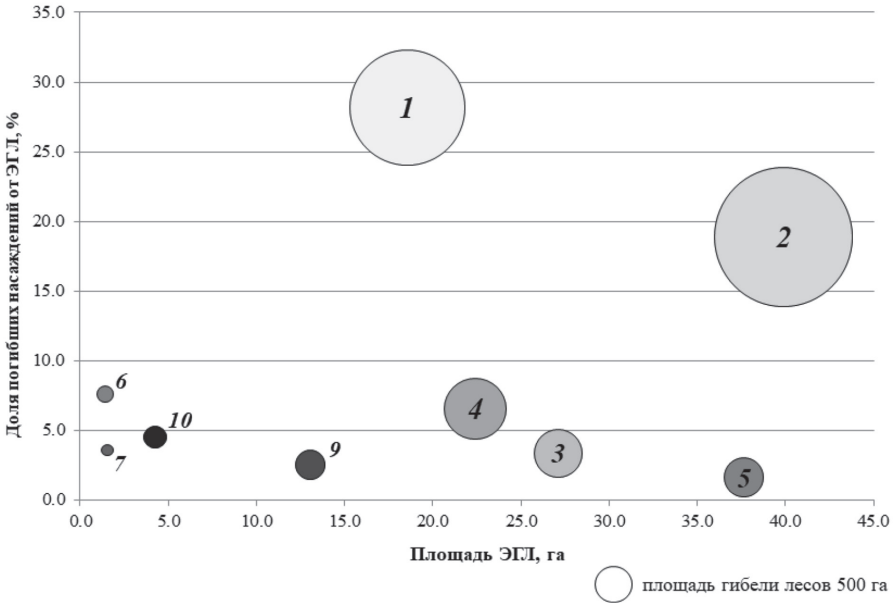


Рис. 5. Соотношение доли погибших насаждений в ЭГЛ с ее общей площадью в ПГРЭЗ (номера ЭГЛ – в табл. 2)

Fig. 5. The ratio of the proportion of dying forest stands in the forest ecological groups to its total area in the PSRR (forest ecological groups' numbers are given in Table 2)

Погибшие насаждения сосредоточены в сосновых лесах на бедных песчаных почвах (12,4 тыс. га, 75,3 %). Крупные участки с гибелью лесов отмечены в сосновых (1,4 тыс. га, 8,7 %) и березовых (0,8 тыс. га, 4,8 %) лесах на относительно богатых почвах.

Наименее устойчивыми оказались сосняки (до 28,8 % погибших насаждений от площади ЭГЛ) и березняки (до 17,4 %) на бедных и относительно богатых почвах различной степени увлажнения, что в целом повторяет порядок ведущих позиций по общей площади гибели и отражает неудовлетворительное санитарное состояние доминирующей лесной формации заповедника.

Более устойчивы сосняки и березняки на относительно богатых почвах нормального и повышенного увлажнения и на оторфованных минеральных почвах олиготрофного заболачивания. Наименьшая доля погибших насаждений отмечена в лиственных лесах наиболее влажных местообитаний.

Категории лесов по степени устойчивости к лесопатологической угрозе. На основе данных о подверженности ЭГЛ к негативному воздействию для обоих объектов выделены 5 категорий лесов по степени устойчивости к лесопатологической угрозе (табл. 3, рис. 6).

Таблица 3. **Категории устойчивости лесов к возникновению лесопатологической угрозы**

Table 3. **Categories of forest resistance to forest pathological threats**

Категория устойчивости	Доля погибших насаждений в формациях ЭГЛ, %	Площадь			
		НП «Беловежская пуща»		ПГРЭЗ	
		тыс. га	%	тыс. га	%
1 (наименее устойчивые)	>20,0	2,4	1,8	17,6	10,6
2 (неустойчивые)	15,0–20,0	64,6	49,1	39,0	23,5
3 (среднеустойчивые)	10,0–15,0	15,2	11,6	1,9	1,2
4 (устойчивые)	3,0–10,0	15,7	11,9	50,1	30,2
5 (наиболее устойчивые)	<3,0	33,6	25,6	57,4	34,6

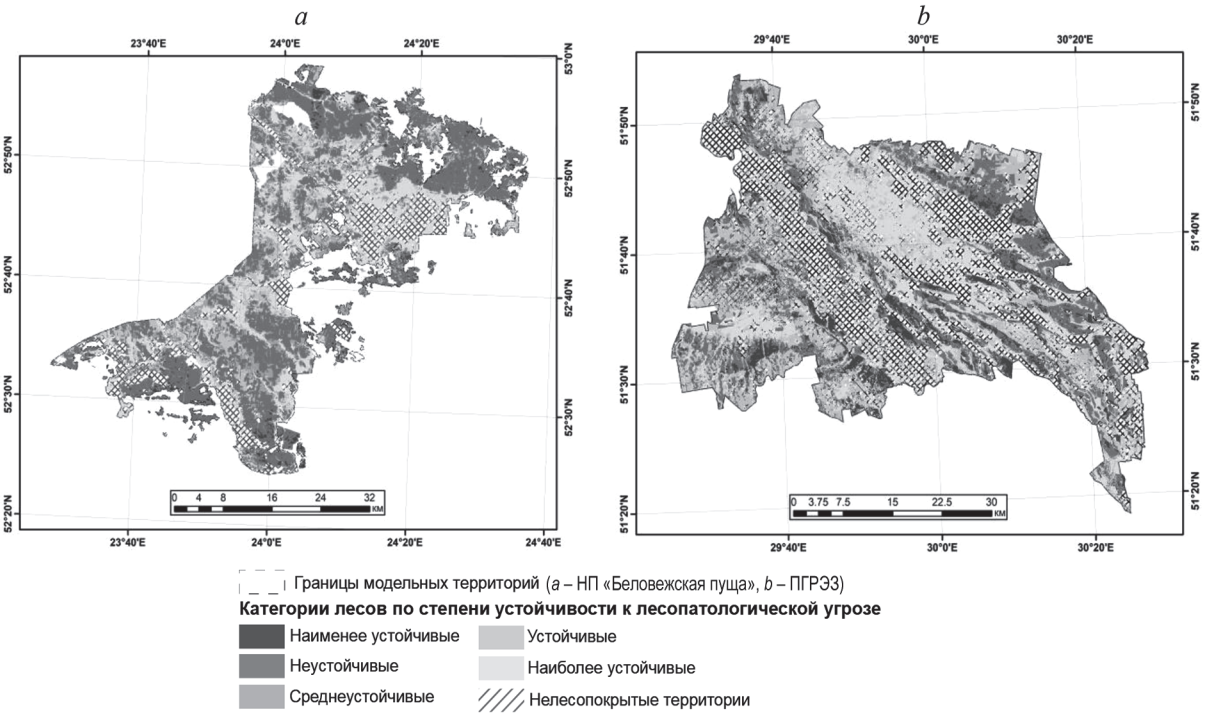


Рис. 6. Устойчивость лесов к лесопатологической угрозе (*a* – НП «Беловежская пуща, *b* – ПГРЭЗ)

Fig. 6. Forest resistance to the forest pathological threats (a – NP “Belovezhskaya Pushcha”, *b* – PSRR)

Таким образом, в НП «Беловежская пуща» 50,9 % лесов имеют высокий риск возникновения лесопатологических процессов, они располагаются в основном в северной и юго-восточной части объекта. В ПГРЭЗ низкоустойчивые насаждения размещаются компактными массивами в периферийных частях объекта, составляя 34,1 % площади всех лесов.

Полученная схема служит пространственной основой мониторинга состояния лесов и разработки превентивных мер в слабоустойчивых насаждениях. Она описывает долгосрочный потенциал риска и обладает свойством динамичности. При поступлении актуальных сведений об изменении состояния или структуры насаждений участки могут быть отнесены к иным категориям устойчивости. Наиболее важно, что на ее основе возможно составление прогноза риска гибели насаждений, где рассчитываемые 3-летние значения WMA KBDI выступают в качестве предиктора потенциала усыхания на следующий год, когда сведения об устойчивости насаждений к стрессу используются как множитель климатического показателя (1,2 – 1 категория, 1,1 – 2 категория, 1,0 – 3 категория, 0,9 – 4 категория, 0,8 – 5 категория).

Итоговым продуктом алгоритма является карта-схема прогнозируемого риска возникновения лесопатологических процессов в соответствии с адаптированным индексом aKBDI, где значения 0–10 отражают отсутствие риска, 10–20 – низкий риск, 20–30 – умеренный, 30–40 – средний, 40–50 – повышенный, 50–60 – высокий, 60–70 – очень высокий, 70 и более – экстремально высокий (рис. 7).

Проверка подхода на примере ПГРЭЗ за период с 2016 по 2018 г. с максимальной гибелью лесов (6,5 тыс. га) после засухи 2015 г. показала, что наиболее высокий риск отмечен на 48,0 тыс. га (28,9 % площади всех лесов), в пределах которых гибель лесов встречалась на 3,8 тыс. га (76,9 % всех погибших насаждений за тестовый период) (рис. 8).

Таким образом, смоделированный потенциал и фактическая гибель лесов в значительной мере совпадают. При этом не все насаждения, определенные как потенциально уязвимые, погибают ввиду того, что подход позволяет оценить степень риска, а его уточнение требует привлечения дополнительных сведений.

В дальнейшей перспективе исследований по данному направлению видится повышение детализации получаемых результатов через добавление важных факторов формирования устойчивости – возрастной структуры и категорий лесов. Однако даже при такой дифференциации невозможно точечно отразить участки лесов, где вероятность гибели будет довольно высока в предстоящем году – на такой исход событий влияет довольно большое количество факторов.

Несомненно, рассмотренный подход требует регулярного обновления входной информации. Во-первых, актуальные данные о площадях гибели лесов служат новыми эталонными объектами и повышают качество классификации спутниковых композитов. Во-вторых, немаловажным является элемент естественной динамики растительности, усложняющий спектральные характеристики объектов, а также приводящий к развитию восстановительных процессов растительности и появлению лесов на ныне нелесопокрытых землях, которые также должны включаться в пространственную выборку. Разработанный алгоритм допускает такое обновление с высокой точностью и оперативностью.

Заключение. С применением алгоритма Random Forest для классификации спутниковых снимков получены ежегодные пространственные сведения о гибели лесов в НП «Беловежская пуща» и ПГРЭЗ за 2001–2025 гг. Пиковые значения площадей погибших насаждений для двух объектов пришлись на 2016–2018 гг.: в НП «Беловежская пуща» – на 2016 г. после засухи 2015 г., в ПГРЭЗ – на 2018 г. после трех засушливых летних сезонов 2015–2017 гг.

Масштабы гибели лесов имеют сильную зависимость от климатических условий, сложившихся на протяжении предыдущих лет, что хорошо отражают значения взвешенных скользящих средних индекса KBDI за 3 года с временным лагом в +1 год.

Устойчивость насаждений существенно зависит от типа местообитания, где наибольший риск гибели древостоя на двух объектах характерен для хвойных и хвойно-мелколиственных лесов на бедных песчаных почвах недостаточного и неустойчивого увлажнения. На основе доли погибших насаждений в структуре площадей различных ЭГЛ определены 5 категорий устойчивости лесов к возникающему стрессу, среди которых низкоустойчивые составили 50,9 и 34,1 % площади всех лесов в НП «Беловежская пуща» и ПГРЭЗ соответственно.

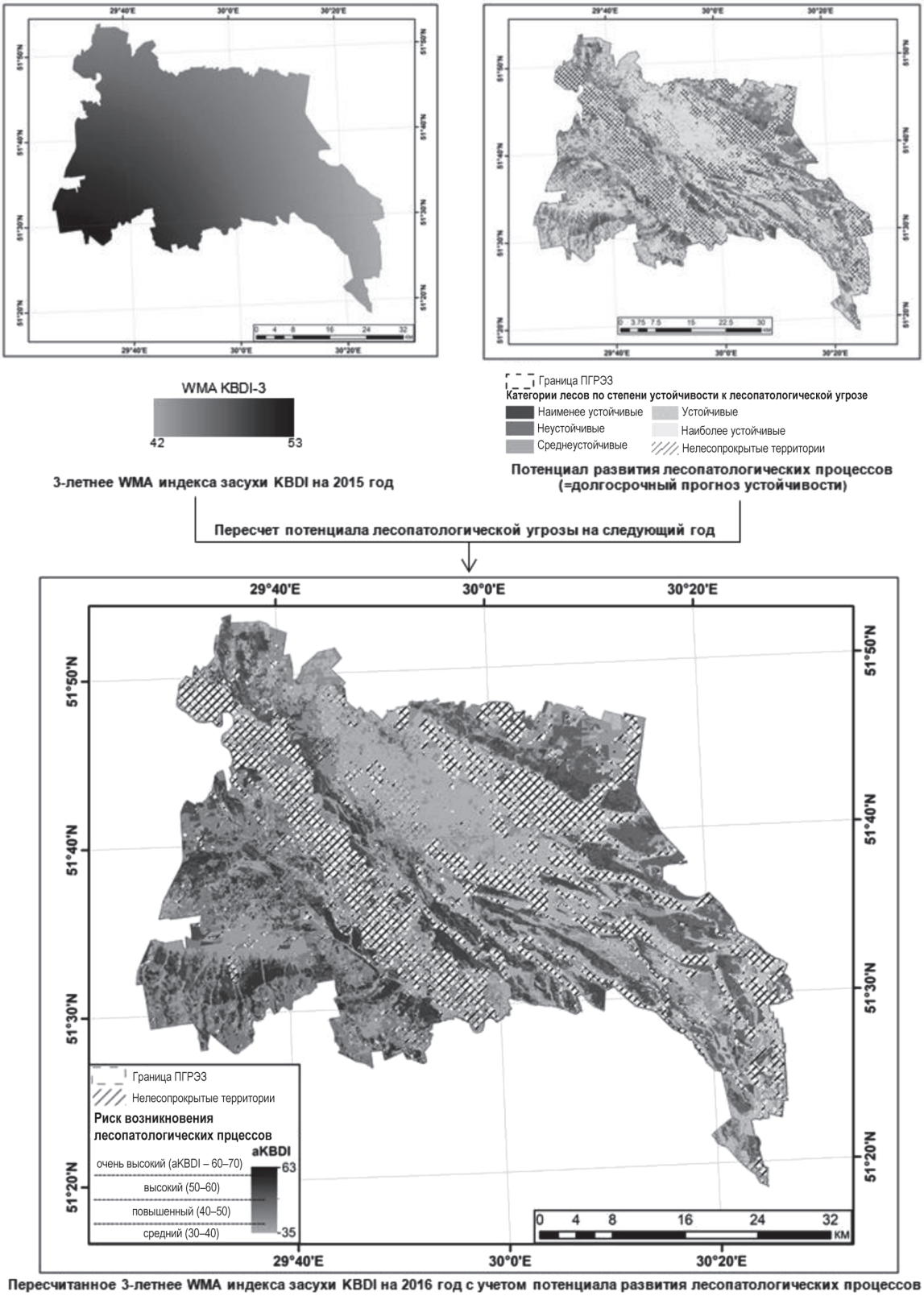


Рис. 7. Пример ежегодного прогнозирования риска возникновения лесопатологических процессов

Fig. 7. Example of annual forecasting of the risk of forest pathological processes

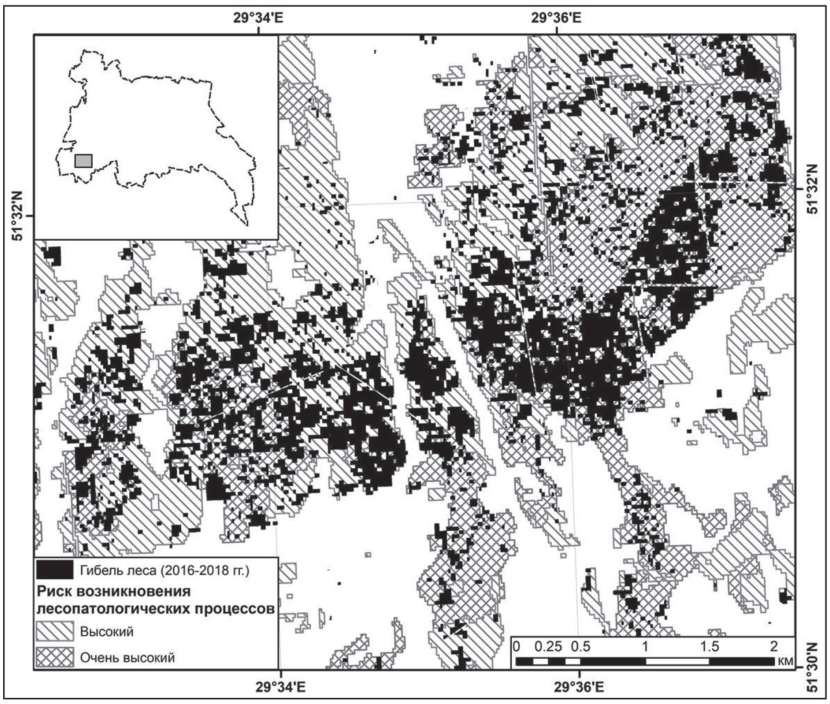


Рис. 8. Сопоставление участков с гибелью лесов и наиболее высокой степенью риска возникновения лесопатологических процессов

Fig. 8. Comparison of areas with forest loss and the highest risk of forest pathological processes

На базе полученных данных о климатической обусловленности гибели лесов и устойчивости различных ЭГЛ модельных территорий составлен алгоритм прогнозирования риска возникновения лесопатологических процессов, позволяющий после окончания вегетационного сезона определить участки леса, где в следующем году вероятность гибели древостоя наиболее высока.

Ежегодно получаемые прогнозные сведения могут являться важным элементом в принятии своевременных решений о проведении мероприятий по поддержанию санитарного состояния лесов. Подтверждением этому являются результаты исследования, где отражены возможности применения современных достижений информационных технологий, начиная от получения исходных сведений о расположении погибших насаждений до прогнозирования риска развития лесопатологических процессов в ныне относительно здоровых лесах. В ходе дальнейших исследований планируется более детально определить критерии для выделения категорий лесов по степени устойчивости к возникающему стрессу, что позволит повысить объективность составляемого прогноза.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список использованных источников

1. Гниненко, Ю. И. Проблема усыхания сосняков и роль вершинного короеда в этом процессе / Ю. И. Гниненко, Н. И. Лямцев // Лесохозяйственная информация. – 2022. – № 3. – С. 84–94.

2. Сазонов, А. А. Массовое усыхание сосновых лесов Беларуси: особенности, причины, последствия / А. А. Сазонов, В. Б. Звягинцев // Дендробионтные беспозвоночные животные и грибы и их роль в лесных экосистемах: X Чтения памяти О. А. Катаева: материалы Междунар. конф., Санкт-Петербург, 22–25 окт. 2018 г. / С.-Петерб. гос. лесотехн. ун-т им. С. М. Кирова; отв. ред.: Д. Л. Мусолина, А. В. Селиховкина. – СПб., 2018. – Т. 2: Фитопатогенные грибы, вопросы патологии и защиты леса. – С. 28–29.

3. Temperature sensitivity of drought-induced tree mortality portends increased regional die-off under global-change-type drought / H. D. Adams, M. Guardiola-Claramonte, G. A. Barron-Gafford [et al.] // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. – 2009. – Vol. 106, N 17. – P. 7063–7066. https://doi.org/10.1073/pnas.0901438106

4. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests / C. D. Allen, A. K. Macalady, H. Chenchouni [et al.] // Forest Ecology and Management. – 2010. – Vol. 259, N 4. – P. 660–684. https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2009.09.001

5. Allen, C. D. On underestimation of global vulnerability to tree mortality and forest die-off drom hotter drought in the Anthropocene / C. D. Allen, D. D. Breshears, N. G. McDowell // Ecosphere. – 2015. – Vol. 6, N 8. – Art. 129. – https://doi.org/10.1890/ES15-00203.1

6. Anderegg, W. R. L. Consequnces of widespread tree mortality triggered by drought and temperature stress / W. R. L. Anderegg, J. M. Kane, L. D. L. Anderegg // Nature Climate Change. – 2012. – Vol. 3, N 1. – P. 30–36. https://doi.org/10.1038/nclimate1635

7. Climate Warming Drought in the Bialowieza Forest from 1950–2015 and Their Impact in the Dieback of Norway Spruce Stands / A. Boczoń, A. Kowalska, M. Ksepko, K. Sokołowski // Water. – 2018. – Vol. 10. – Art. 1502. – https://doi.org/10.3390/W10111502

8. Kharuk, V. I. Climate-induced mortality of spruce stands in Belarus / V. I. Kharuk, S. Im, M. L. Dvinskaya [et al.] // Environmental Research Letter. – 2015. – Vol. 10, N 12. – Art. 125006. https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/12/125006

9. Global field observations of tree die-off reveal hotter-drought fingerprint for Earth's forests / W. M. Hammond, A. P. Williams, J. T. Abatzoglou [et al.] // Nature Communications. – 2022. – Vol. 13, N 1. – Art. 1761. https://doi.org/10.1038/s41467-022-29289-2

10. Excess forest mortality is consistently linked to drought across Europe / C. Senf, A. Buras, C. S. Zang [et al.] // Nature Communications. – 2020. – Vol. 11, N 1. – Art. 6200. https://doi.org/10.1038/s41467-020-19924-1

11. Weed, A. S. Consequences of climate change for biotic disturbances on North American forests / A. S. Weed, M. P. Ayres, J. A. Hicke // Ecological Monographs. – 2013. – Vol. 83, N. 4. – P. 441–470. https://doi.org/10.1890/13-0160.1

12. Анализ динамики лесного растительного покрова Беларуси на основе данных дистанционного зондирования / Д. Г. Груммо, А. В. Пугачевский, С. Г. Русецкий, Н. А. Зеленкевич // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя біялагічных навук. – 2022. – Т. 67, № 3. – С. 293–303.

13. Жибуль, А. А. Мониторинг лесов / А. А. Жибуль // Национальная система мониторинга окружающей среды в Республике Беларусь: результаты наблюдений, 2024 год / Н. Г. Бибова, В. В. Парфенов, П. В. Пальчех [и др.]; под ред. Е. А. Мельник. – Мн., 2025. – Гл. 9. – С. 326–355.

14. Алексеев, А. С. Выявление повреждений хвойных насаждений на основе комплексного анализа результатов дистанционного зондирования Земли и наземных обследований / А. С. Алексеев, Д. М. Черняховский // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2024. – № 2. – С. 11–27.

15. Обнаружение усыханий хвойных лесов по авиакосмическим данным / Л. В. Катковский, О. О. Силюк, Б. И. Беляев [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. – Т. 19, № 3. – С. 88–102.

16. Лабутина, И. А. Использование данных дистанционного зондирования для мониторинга экосистем ООПТ: метод. пособие / И. А. Лабутина, Е. А. Балдина. – М.: Всемир. фонд дикой природы (WWF России), 2011. – 88 с.

17. Byer, S. Detecting Drought-Induced Tree Mortality in Sierra Nevada Forests with Time Series of Satellite Data / S. Byer, J. Yufang // Remote Sensing. – 2017. – Vol. 9, N 9. – Art. 929. https://doi.org/10.3390/rs9090929

18. Climate-Change-Driven Droughts and Tree Mortality: Assessing the Potential of UAV-Derived Early Warning Metrics / E. B. Ewane, M. Midhun, B. Shaurya [et al.] // Remote Sensing. – 2023. – Vol. 15, N 10. – Art. 2627. https://doi.org/10.3390/rs15102627

19. Sentinel-2 Data in an Evaluation of the Impact of the Disturbances on Forest Vegetation / J. Lastovicka, P. Svec, D. Paluba [et al.] // Remote Sensing. – 2020. – Vol. 12, N 12. – Art. 1914. https://doi.org/10.3390/rs12121914

20. Detection of Fir Trees (Abies Sibirica) Damaged by the Bark Beetle in Unmanned Aerial Vehicle Images with Deep Learning / A. Safonova, S. Tabik, D. Alcaraz-Segura [et al.] // Remote Sensing. – 2019. – Vol. 11, N 6. – Art. 643. https://doi.org/10.3390/rs11060643

21. Mapping Tree Mortality Caused by Siberian Silkmoth Outbreak Using Sentinel-2 Remote Sensing Data / O. A. Slinkina, P. V. Mikhaylov, S. M. Sultson [et al.] // Remote Sensing. – 2023. – Vol. 14, N 12. – Art. 2436. https://doi.org/10.3390/f14122436

22. Чайковский, А. И. К вопросу о придании природоохранного статуса Полесскому государственному радиационно-экологическому заповеднику / А. И. Чайковский, М. В. Кудин, Д. Г. Груммо [и др.] // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя біялагічных навук. – 2025. – Т. 70, № 1. – С. 80–88.

23. Landsat satellites images catalog // Google Earth Engine. – URL: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/landsat (date of access: 10.01.2026).

24. Sentinel-2 images catalog // Google Earth Engine. – URL: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/sentinel-2?hl=en (date of access: 10.01.2026).

25. Keetch, J. J. A Drought Index for Forest Fire Control / J. J. Keetch, G. M. Byram. – Asheville: Dep. of Agricult., Forest Service, Southeastern Forest Experim. Station, 1968. – 35 p.

26. Vicente-Serrano, S. M. A Multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index–SPEI / S. M. Vicente-Serrano, S. Beguería, J. I. López-Moreno // Journal of Climate. – 2010. – Vol. 23, N 7. – P. 1696–1718. https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1

27. Битвинскас, Т. Т. Дендроклиматические исследования / Т. Т. Битвинскас. – Л.: Гидрометеоиздат, 1974. – 172 с.

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

29. SPEI Global Drought Monitor Maps // SPEI Global Drought Monitor. – URL: https://spei.csic.es/map/maps.html (date of access: 10.01.2026).

30. ERA5 Daily Aggregates // Google Earth Engine. – URL: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/ECMWF_ERA5_DAILY?hl=ru (date access: 10.01.2026).

31. Маслов, А. Д. Короед-типограф и усыхание еловых лесов / А. Д. Маслов. – Пушкино: Всерос. науч.-исслед. ин-т лесоводства и механизации лес. хоз-ва, 2010. – 130 с.

32. Гельтман, В. С. Географический и типологический анализ лесной растительности Белоруссии / В. С. Гельтман. – Мн.: Наука и техника, 1982. – 326 с.

33. Развитие системы функционального зонирования национального парка «Беловежская пуща» / А. В. Бурый, В. М. Арнольбик, Д. И. Бернацкий, В. Г. Кравчук // Беловежская пуща. Исследования: сб. науч. ст. / Гос. природоохран. учреждение «Нац. парк “Беловеж. Пуща”». – Брест, 2017. – Вып. 15. – С. 6–16.

References

1. Gninenko Yu. I., Lyamtsev N. I. Drying Out of Pine Forests and the Role of the *Ips acuminatus*. *Lesokhozyaistvennaya informatsiya = Forestry Information*, 2022, no. 3, pp. 84–94 (in Russian).

2. Sazonov A. A., Zvyagintsev V. B. Massive drying of pine forests in Belarus: features, causes, consequences. *Dendrobiontnye bespozvonochnye zhivotnye i griby i ikh rol' v lesnykh ekosistemakh: X Chteniya pamyati O. A. Kataeva: materialy Mezhdunarodnoi konferentsii, Sankt-Peterburg, 22–25 oktyabrya 2018 goda* [Dendrobiont invertebrates and fungi and their role in forest ecosystems: 10th Readings in memory of O. A. Kataev: Proceedings of the international conference, St. Petersburg, October 22–25, 2018]. St. Petersburg, 2018, pp. 28–29 (in Russian).

3. Adams H. D., Guardiola-Claramonte M., Barron-Gafford G. A., Villegas J. C., Breshears D. D., Zou C. B., Troch P. A., Huxman T. E. Temperature sensitivity of drought-induced tree mortality portends increased regional die-off under global-change-type drought. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, vol. 106, no. 17, pp. 7063–7066. https://doi.org/10.1073/pnas.0901438106

4. Allen C. D., Macalady A. K., Chenchouni H., Bachelet D., McDowell N., Vennetier M., Kitzberger T., Rigling A., Breshears D. D., Hogg E. H., Gonzalez P., Fensham R., Zhang Z., Castro J., Demidova N., Lim J.-H., Allard G., Running S. W., Semerci A., Cobb N. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, 2010, vol. 259, no. 4, pp. 660–684. https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2009.09.001

5. Allen C. D., Breshears D. D., McDowell N. G. On underestimation of global vulnerability to tree mortality and forest die-off drom hotter drought in the Anthropocene. *Ecoshere*, 2015, vol. 6, no. 8, art. 129. https://doi.org/10.1890/ES15-00203.1

6. Anderegg W. R. L., Kane J. M., Anderegg L. D. L. Consequnces of widespread tree mortality triggered by drought and temperature stress. *Nature Climate Change*, 2012, vol. 3, no. 1, pp. 30–36. https://doi.org/10.1038/nclimate1635

7. Boczoń A, Kowalska A., Ksepko M., Sokołowski K. Climate Warming Drought in the Bialowieza Forest from 1950–2015 and Their Impact in the Dieback of Norway Spruce Stands. *Water*, 2018, vol. 10, art. 1502. https://doi.org/10.3390/W10111502

8. Kharuk V. I., Im S., Dvinskaya M. L., Golukov A. S., Ranson K. J. Climate-induced mortality of spruce stands in Belarus. *Environmental Research Letter*, 2015, vol. 10, no. 12, art. 125006. https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/12/125006

9. Hammond W. M., Williams A. P., Abatzoglou J. T., Adams H. D., Klein T., López R., Sáenz-Romero C., Hartmann H., Breshears D. D., Allen C. D. Global field observations of tree die-off reveal hotter-drought fingerprint for Earth's forests. *Nature Communic*, 2020, vol. 11, no. 1, art. 1761. https://doi.org/10.1038/s41467-022-29289-2

10. Senf C., Buras A., Zang C. S., Rmmig A., Seidl R. Excess forest mortality is consistently linked to drought across Europe. *Nature Communic*, 2020, vol. 11, no. 1, art. 6200. https://doi.org/10.1038/s41467-020-19924-1

11. Weed A. S., Ayres M. P., Hicke J. A. Consequences of climate change for biotic disturbances on North American forests. *Ecolologica Monographs*, 2013, vol. 83, no. 4, pp. 441–470. https://doi.org/10.1890/13-0160.1

12. Grummo D. G., Pugachevskii A. V., Rusetskii S. G., Zelenkevich N. A. Analysis of Forest Cover Dynamics in Belarus Based on Remote Sensing Data. *Vestsi Natsyyanal'nay akademii navuk Belarusi. Seryya biyalagichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological Series*, 2022, vol. 67, no. 3, pp. 293–303 (in Russian).

13. Zhibul' A. A. Forest monitoring. *National Environmental Monitoring System in the Republic of Belarus: Observation Results*, *2024.* Minsk, 2025, ch. 7, pp. 326–355 (in Russian).

14. Alekseev A. S., Chernikhovskii D. M. Identification of Damage to Coniferius Stands Based on Comprehensive Analysis of the Results of Remote Sensing of the Earth and Ground Surveys. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Lesnoi zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2024, no. 2, pp. 11–28 (in Russian).

15. Katkovskii L. V., Silyuk O. O., Belyaev B. I., Belyaev M. Yu., Sarmin E. E., Bruchkovskii I. I., Gulyaeva S. I., Litvinovich G. S., Davidovich Yu. S. Detection of drying coniferous forests from aerospace data. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern problems of remote sensing of the Earth from space], 2022, vol. 19, no. 3, pp. 88–102 (in Russian).

16. Labutina I. A., Baldina E. A. *Using Remote Sensing Data to Monitor Ecosystems in Protected Area*s. Moscow, World Wildlife Fund Russia, 2011. 88 p. (in Russian).

17. Byer S., Yufang J. Detecting Drought-Induced Tree Mortality in Sierra Nevada Forests with Time Series of Satellite Data. *Remote Sensing*, 2017, vol. 9, no. 9, art. 929. https://doi.org/10.3390/rs9090929

18. Ewane B. E., Midhun M., Shaurya B., Galgamuwa G. A. P., Watt M. S., Arachchige P. P., Hudak A. T., Richardson G., Ajithkumar N., Srinivasan S., Corte A. P. D., Johnson D. J., Broadbent E. N., de-Miguel S., Bruscolini M., Young D. J. N., Shafai S., Abdullah M. M., Jaafar W. S. W. M., Doaemo W., Silva C. A., Cardil A. Climate-Change-Driven Droughts and Tree

Mortality: Assessing the Potential of UAV-Derived Early Warning Metrics. *Remote Sensing*, 2023, vol. 15, no. 10, art. 2627. https://doi.org/10.3390/rs15102627

19. Lastovicka J., Svec P., Paluba D., Kobliuk N., Svoboda J., Hladky R., Stych P. Sentinel-2 Data in an Evaluation of the Impact of the Disturbances on Forest Vegetation. *Remote Sensing*, 2020, vol. 12, no. 12, art. 1914. https://doi.org/10.3390/rs12121914

20. Safonova A., Tabik S., Alcaraz-Segura D., Rubtsov A., Maglinets Yu., Herrera F. Detection of Fir Trees (Abies Sibirica) Damaged by the Bark Beetle in Unmanned Aerial Vehicle Images with Deep Learning. *Remote Sensing*, 2019, vol. 11, no. 6, art. 643. https://doi.org/10.3390/rs11060643

21. Slinkina O. A., Mikhaylov P. V., Sultson S. M., Demidko D. A., Khizhniak N. P., Ttatrintsev A. I. Mapping Tree Mortality Caused by Siberian Silkmoth Outbreak Using Sentinel-2 Remote Sensing Data. *Remote Sensing*, 2023, vol 14, no. 12, art. 2436. https://doi.org/10.3390/f14122436

22. Chaikovskii 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. *Vestsi Natsyyanal'nay 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).

23. *Landsat satellites images catalog (2026).* Available at: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/landsat (accessed 10.01.2026).

24. *Sentinel-2 images catalog (2026).* Available at: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/sentinel-2 (accessed 10.01.2026).

25. Keetch J. J., Byram G. M. A. *Drought Index for Forest Fire Control.* Asheville, Department of Agriculture, Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station, 1968. 35 p.

26. Vicente-Serrano S. M., Beguería S., López-Moreno J. I. Multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index–SPEI. *Journal of Climate*, 2010, vol. 23, no. 7, pp 1696–1718. https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1

27. Bitvinskas T. T. *Dendroclimatic research*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1974. 172 p (in Russian).

28. Selyaninov G. T. On agricultural climate assessment. *Trudy po sel'skokhozyaistvennoi meteorologii* [Works on agricultural meteorology], 1928, iss. 20, pp. 165–177 (in Russian).

29. SPEI Global Drought Monitor Maps (2026). *SPEI Global Drought Monitor.* Available at: https://spei.csic.es/map/maps.html (accessed 10.01.2026).

30. ERA5 Daily Aggregates. *Google Earth Engine.* Available at: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/ECMWF_ERA5_DAILY (accessed 10.01.2026).

31. Maslov A. D. *The bark beetle and the dying out of spruce forests*. Pushkino, All-Russian Scientific Research Institute of Forestry and Forestry Mechanization, 2010. 130 p. (in Russian).

32. Gel'tman V. S. Geographical and typological analysis of the forest vegetation of Belarus. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1982. 326 p. (in Russian).

33. Buryi A. V., Arnol'bik V. M., Bernatskii D. I., Kravchuk V. G. Development of a functional zoning system for the national park. *Belovezhskaya pushcha. Issledovaniya: sbornik nauchnykh statei* [Belovezhskaya Pushcha. Research: A Collection of Scientific Articles]. Brest, 2017, iss. 15, pp. 6–16 (in Russian).

Информация об авторах

Роговский Никита Михайлович – мл. науч. сотрудник, аспирант. Институт экспериментальной ботаники им. В. Ф. Купревича НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: nikita.rogovski.03@gmail.com

Груммо Дмитрий Геннадьевич – д-р биол. наук, доцент, директор. Институт экспериментальной ботаники им. В. Ф. Купревича НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: dm.grumo@botany.by

Information about the authors

Nikita M. Rogovsky – Junior Researcher, Postgraduate Student. 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: nikita.rogovski.03@gmail.com

Dzmitry G. Grummo – D. Sc. (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: dm.grumo@botany.by

ISSN 1029-8940 (Print)
ISSN 2524-230X (Online)
УДК [575:616.155.303]:[616.98:578.834.1]-06
https://doi.org/10.29235/1029-8940-2026-71-4-332-343

Поступила в редакцию 20.08.2026
Received 20.08.2026

А. С. Шафорост, Е. В. Воропаев, Н. В. Галиновская, А. А. Зятьков, О. В. Осипкина, А. А. Барбарович

Гомельский государственный медицинский университет, Гомель, Республика Беларусь

АНАЛИЗ ТРАНСКРИПТОМА МОНОНУКЛЕАРНЫХ КЛЕТОК ПЕРИФЕРИЧЕСКОЙ КРОВИ У ПАЦИЕНТОВ С СОСТОЯНИЕМ ПОСЛЕ COVID-19 НА ОСНОВЕ ДАННЫХ НАНОПОРОВОГО СЕКВЕНИРОВАНИЯ

Аннотация. По данным ВОЗ, вероятность развития осложнений после коронавирусной инфекции составляет 10–20 %. Состояние после COVID-19 снижает качество жизни пациентов, важную роль в его развитии играет изменение реактивности иммунной системы. Пилотное исследование транскриптома мононуклеарных клеток периферической крови (МНК) пациентов с состоянием после COVID-19 с применением нанопорового секвенирования позволяет получить предварительные данные для характеристики функционального статуса МНК и выявления потенциальных мишеней для разработки новых эффективных средств персонализированной терапии данного заболевания.

В исследовании участвовали 5 пациентов с симптомами состояния после COVID-19 длительностью 3–6 месяцев. В качестве контроля использовали данные секвенирования транскриптома МНК 6 здоровых добровольцев. Секвенирование транскриптома производили на секвенаторе PromethION 2 Solo (ячейки FLO-PRO114M (R10.4.1), применяли набор для пробоподготовки Native Barcoding Kit 24 V14 (SQK-NBD114.24). Анализ дифференциальной экспрессии (ДЭ) генов осуществляли с помощью DESeq2. Для анализа обогащения в терминах генной онтологии (Gene Ontology, GO) использовали R-пакет clusterProfiler (4.14.6). Для определения семантического сходства терминов GO – REViGO, построение функциональных сетей в виде сети GO-терминов (биологические процессы) выполняли в CytoScape 3.10.4.

Выявлено 41 164 экспрессируемых гена, в том числе 5 309 генов имели значимо различающуюся экспрессию (log_2FoldChange > |1|, padj < 0,05); 2 102 гена ассоциированы с 163 биологическими процессами в терминах GO: 146 из них характеризовались снижением экспрессии генов, 17 – повышенной. Наблюдаются изменения, ассоциированные со снижением показателей, характерных для пролиферативной активности МНК, ослаблением интенсивности процессов, связанных с врожденным и адаптивным иммунитетом, и перестройкой метаболических процессов в сторону стабилизации состояния клеток на фоне активации биогенеза рибосом, окислительного фосфорилирования и подавления протеолиза.

Ключевые слова: состояние после COVID-19, транскриптом, мононуклеарные клетки периферической крови человека, нанопоровое секвенирование, дифференциальная экспрессия генов, биологический процесс, системный анализ

Для цитирования: Анализ транскриптома мононуклеарных клеток периферической крови у пациентов с состоянием после COVID-19 на основе данных нанопорового секвенирования / А. С. Шафорост, Е. В. Воропаев, Н. В. Галиновская [и др.] // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя біялагічных навук. – 2026. – Т. 71, № 4. – С. 332–343. https://doi.org/10.29235/1029-8940-2026-71-4-332-343

Alexander S. Shaforost, Evgenii V. Voropaev, Natallia V. Halinouskaya, Aliaksei A. Ziatskov, Olga V. Osipkina, Anastasia A. Barbarovich

Gomel State Medical University, Gomel, Republic of Belarus

PBMC TRANSCRIPTOME ANALYSIS IN LONG COVID PATIENTS BASED ON NANOPORE SEQUENCING DATA

Abstract. According to the WHO, the risk of developing complications after SARS-CoV-2 infection is 10–20 %. Long COVID leads to a decrease in patients' quality of life, and changes in immune system reactivity play a significant role in this. This pilot study of the PBMC transcriptome in patients with long COVID using nanopore sequencing aims to provide preliminary data on the functional status of PBMC and identify potential targets for the development of new effective personalized therapies for this disease.

The transcriptome analysis protocol included RNA extraction (GeneJET RNA Purification Kit), DNA removal (DNase I), double-stranded cDNA synthesis (Mint kit-2), sequencing library preparation (SQK-NBD114.24), nanopore sequencing (PromethION 2 Solo, FLO-PRO114M (R10.4.1) cells), basecalling (Dorado), read quality assessment (nanoQC/FastQC), adapter trimming and length/quality filtering (Cutadapt (5.2)/seqkit(2.12.0)), and data preparation for differential gene expression assessment (minimap2 in map-ont mode, samtools (1.10.2), Picard tools (CollectRnaSeqMetrics), featureCounts (2.1.1), biomaRt

(2.62.1)), differential expression analysis (RStudio 2025.05.0 Build 418, DESeq2 (1.46.0), pheatmap (1.0.13), dplyr (1.1.4), RColorBrewer (1.1.-3), ggplot2 (3.5.2), ggrepel (0.9.6), apeglm (1.28.0) packages), GSEA-analysis (clusterProfiler (4.14.6), org.Hs.eg.db (3.20.0), enrichplot (1.26.6), DOSE (4.0.1), igraph (2.2.1)), semantic similarity of GO terms (biological process (BP) analysis (REViGO)), BP functional network creation (Cytoscape 3.10.4).

A pilot study of the peripheral blood leukocyte transcriptome in patients with long COVID using nanopore sequencing revealed significant differences in gene expression (n = 2,102) involved in 163 biological processes. Analysis of these changes in activity indicated a significant decrease in the overall functional activity of leukocytes, accompanied by a decrease in proliferative activity, weakening of innate and adaptive immunity, and a restructuring of metabolic processes toward cellular stabilization against the background of increased ribosome biogenesis, activation of oxidative phosphorylation and suppression of proteolysis.

Keywords: long COVID syndrome, transcriptome, human leukocytes, nanopore sequencing, differential gene expression, biological process, systemic analysis

For citation: Shaforost A. S., Voropaev E. V., Halinouskaya N. V., Ziatskov A. A., Osipkina O. V., Barbarovich A. A. PBMC transcriptome analysis in long COVID patients based on nanopore sequencing data. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya biyalagichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological series*, 2026, vol. 71, no. 4, pp. 332–343 (in Russian). https://doi.org/10.29235/1029-8940-2026-71-4-332-343

Введение. Исследование триады «дезоксирибонуклеиновая кислота (ДНК)−рибонуклеиновая кислота (РНК)–белок» («ДНК–РНК–белок») является важным элементом в понимании механизмов функционирования организма на клеточном и тканевом уровнях. Изучение транскриптома (набора последовательностей РНК (транскриптов)) позволяет оценивать динамические изменения экспрессии генов в ответ на воздействие различных факторов, в том числе инфекционных агентов, и тем самым раскрывает молекулярные механизмы развития и персистенции патологических состояний, что особенно важно при исследовании патогенеза воспалительных процессов, иммунного ответа и прогнозировании развития постинфекционных осложнений [1, 2].

Одной из первых технологий изучения транскриптома был серийный анализ экспрессии генов (SAGE), реализуемый секвенированием по Сэнгеру соединенных фрагментов случайных транскриптов [3]. Количество транскриптов оценивалось по числу совпадений с фрагментами известных генов. К концу XX в. методы SAGE и определение экспрессии генов с помощью микрочипов были наиболее распространенными [4].

Появление технологий секвенирования 2-го поколения (Next-generation sequencing, NGS) – 454 LifeSciences (2005), Illumina (2006), SOLiD (2008) и IonTorrent (2010) – привело к кратному увеличению объема получаемой при исследовании транскриптома информации [5], как количества анализируемых транскриптов, так и глубины покрытия, а также к существенному снижению стоимости секвенирования 1 образца. Описанные технологии позволяют секвенировать короткие фрагменты длинной от 50–300 нуклеотидов, чего достаточно для определения экспрессии генов и сборки транскриптов, однако не позволяют выявлять сложные изоформы, исследовать альтернативный сплайсинг и модификации РНК.

Использование технологий секвенирования 3-го поколения, в частности нанопорового секвенирования (НС) (Oxford Nanopore Technologies) [6], дает возможность исследовать структуру нативной РНК, увеличивает длину прочтения по сравнению с решениями 2-го поколения и позволяет снизить затраты на получение 1 Гб данных. В настоящее время исследование транскриптома с применением НС используется для исследования иммунного ответа, персонализации, диагностики и лечения новообразований [7], разработки методов терапии наследственных [8], неврологических и сердечно-сосудистых заболеваний [9]. При инфекционных заболеваниях транскриптомный анализ позволяет выявлять молекулярные маркеры активации врожденного и адаптивного иммунитета, оценивать выраженность воспаления, а также определять патогенетические особенности хронического течения болезни.

Особый интерес в этом отношении представляет состояние после COVID-19 (long COVID), которое характеризуется длительно сохраняющимися клиническими симптомами и мультисистемными нарушениями. В связи с этим транскриптомный анализ является перспективным инструментом для изучения молекулярных механизмов данного состояния, поиска диагностических биомаркеров и определения потенциальных терапевтических мишеней. Для исследования транскриптома у пациентов с состоянием после COVID-19 метод НС используется несколько лет, в связи с чем количество опубликованных научных работ по данной теме незначительно.

Выполненное нами исследование транскриптома человека с использованием НС проведено в Республике Беларусь впервые.

Целью настоящего исследования является анализ транскриптомных профилей МНК у пациентов с состоянием после COVID-19 на основании данных НС.

Объекты и методы исследования. Дизайн исследования: пилотное, единовременное, поперечное, случай-контроль. Исследование проведено на базе кафедры неврологии и нейрохирургии с курсами медицинской реабилитации, ФПКиП, научно-исследовательской лаборатории Гомельского государственного медицинского университета в период с 2023 по 2025 г. Обследуемые заполняли информированное согласие на участие в исследовании, одобренное этическим комитетом университета (протокол № 1 от 03.01.2023).

Исследован биологический материал 5 пациентов (мужчины – 2 человека, женщины – 3) с состоянием после COVID-19, медиана возраста – 44 [44; 48] года. Включенным в исследование пациентам выполнялась оценка общесоматического и неврологического статуса, после чего они заполняли разработанный ранее чек-лист для объективизации диагноза состояния после COVID-19 [10]. Критерии включения в исследование: пациенты старше 18 лет, перенесшие подтвержденную инфекцию COVID-19 и имеющие проявления состояния после COVID-19. Критерии исключения: возраст до 18 и старше 65 лет; соматические заболевания в стадии декомпенсации; острый и подострый инфаркт миокарда; инсульт с неврологическим дефицитом или максимальным размером более 2 см; аневризма левого желудочка сердца или аорты; недостаточность кровообращения выше НIIА; выраженные нарушения сердечного ритма и проводимости; атеросклероз сосудов нижних конечностей с декомпенсацией; тромбоэмболия легочных артерий; демиелинизирующие заболевания центральной нервной системы; заболевания, сопровождающиеся выраженным когнитивным дефицитом, диагностированные до перенесенной инфекции COVID-19; детский церебральный паралич; деменция; тяжелая депрессия; обсессивно-компульсивное, диссоциативно-конверсионное расстройство; шизофрения; биполярное расстройство; последствия черепно-мозговой травмы, инфекционных повреждений головного мозга.

При опросе пациенты предъявляли жалобы преимущественно на нарушение внимания, сна, памяти, туман в голове. Длительность жалоб на момент взятия крови составляла от 3 до 6 месяцев. Из сопутствующих заболеваний у пациентов имела место артериальная гипертензия I степени. Средний балл чек-листа составил 10 баллов, что соответствовало выраженной степени нарушений.

Выделение МНК из цельной крови производили с использованием градиентной среды для выделения лимфоцитов Lymphosep (Biowest). Экстракцию общей РНК выполняли с помощью набора GeneJET RNA Purification Kit (Thermo Fisher Scientific, США). Концентрацию и качество РНК измеряли на флюориметре Qubit4 при помощи набора Qubit™ RNA Broad Range Assay Kit и спектрофотометра NanoDrop 1000 (Thermo Fisher Scientific). Для удаления ДНК из образцов общей РНК использовали ДНКазу I (набор DNase I RNase-free (Thermo Fisher Scientific)). Для синтеза дц кДНК, необходимой при пробоподготовки к НС, применяли набор Mint kit-2 (Евроген, Россия), для синтеза первой цепи кДНК – адаптеры PlugOligo-3M и CDS-4M. Очистка дц кДНК выполнена с помощью набора Illumina Beads (Illumina, США). Концентрацию дц кДНК измеряли на флюориметре Qubit4 с использованием набора Qubit™ 1X dsDNA High Sensitivity Assay Kit. Пробоподготовку образцов дц кДНК для НС выполняли согласно протоколу Ligation sequencing amplicons 2025 – Native Barcoding Kit 24 V14 (SQK-NBD114.24).

НС транскриптома МНК периферической крови 5 пациентов с симптомами состояния после COVID-19 выполняли на секвенаторе PromethION 2 Solo (Oxford Nanopore Technologies, Великобритания) с использованием ячеек FLO-PRO114M (R10.4.1).

В качестве группы сравнения (контроль) были взяты данные секвенирования (файлы в формате FASTQ.gz) транскриптома здоровых добровольцев (мужчины – 3 человека, женщины – 3; номера образцов в NCBI – SRR33963238, SRR33963237, SRR33963236, SRR33963235, SRR33963234, SRR33963233). Участники контрольной группы (средний возраст 31,7 ± 3,1 года) не имели сопутствующих заболеваний. Процедура пробоподготовки и секвенирования образцов для исследования транскриптома выполнялась с применением технологий, схожих с используемыми нами, включая набор для получения библиотек для НС (SQK-NBD114.96), прибор PromethION 2 Solo (Oxford Nanopore Technologies), ячейки FLO-PRO114M.

В качестве референсного генома использовали GRCh38.p14_GENCODE_version 48 (дата выпуска – май 2025 г.). Для биоинформатического анализа данных экспериментальной и контрольной групп применяли программное обеспечение (ПО), указанное в таблице.

ПО для обработки данных секвенирования транскриптома

Software for transcriptome sequencing data processing

Функция ПО	Название ПО (версия)
Бейсколлинг	Dorado
Удаление адаптеров	Cutadapt (5.2)
Оценка качества прочтений	FastQC (0.12.1) / nanoQC
Фильтрация прочтений по длине и качеству	Seqkit (2.12.0)
Выравнивание прочтений на референсный геном человека	minimap2 в режиме map-ont
Фильтрация прочтений, выровненных на референсный геном, и их сортировка	samtools (1.10.2)
Оценка качества выравнивания	Picard tools (CollectRnaSeqMetrics)
Подсчет количества прочтений на транскрипт	featureCounts (2.1.1)
Превращение номеров транскриптов из формата Ensembl ID в Gene symbols	biomaRt (2.62.1)
Расчет дифференциальной экспрессии (ДЭ) генов и визуализация результатов	RStudio 2025.05.0 Build 418, пакеты DESeq2 (1.46.0), pheatmap (1.0.13), dplyr (1.1.4), RColorBrewer (1.1.-3), ggplot2 (3.5.2), ggrepel (0.9.6), apeglm (1.28.0)
Анализ обогащения дифференциально экспрессирующихся генов по функциональной принадлежности	clusterProfiler (4.14.6)

Удаление адаптеров и удаление прочтений короче 200 нуклеотидов и с качеством меньше Q10 позволило снизить уровень шума и повысить качество анализа. Для выравнивания прочтений, полученных с помощью НС, на референсный геном человека использовали ПО minimap2, в качестве альтернативы которому можно применять STAR, GraphMap2. Контроль качества выравнивания осуществляли с использованием команды CollectRnaSeqMetrics утилиты Picard, которая позволяет оценить долю рРНК и мРНК в полученных образцах. Для подсчета количества прочтений на транскрипт использовали featureCounts, однако можно применять NanoCount, StringTie2 и TALON. Оценку ДЭ проводили по генам. Для этого конвертировали данные с преобразованием имен транскриптов в названия соответствующих им генов с помощью пакета biomaRt в RStudio 2025.05.0 Build 418. Анализ ДЭ выполняли с помощью пакета DESeq2: используемая статистическая модель ДЭ основана на отрицательном биномиальном распределении, нормализация количества прочтений между образцами – на расчете медианного отношения геометрического среднего для каждого образца, фактором сравнения являлось наличие или отсутствие состояния после COVID-19.

Для дальнейшего анализа ДЭ использовали гены, для которых различия в величине экспрессии были значимы (padj < 0,05) и отличались более чем в 2 раза (log2FoldChange > 1).

Для функциональной интерпретации дифференциально экспрессирующихся генов проводили анализ обогащения по функциональной принадлежности (Gene Set Enrichment Analysis, GSEA) с использованием пакета clusterProfiler (4.14.6). Для анализа семантического сходства терминов генной онтологии (Gene Ontology, GO) использовали REViGO, после чего формировали функциональные сети и визуализировали их в виде ген–GO-сети и сети GO-терминов в CytoScape 3.10.4.

Результаты и их обсуждение. В ходе анализа полученных данных выявлено 41 164 экспрессируемых гена, из них 5 309 генов имели значимо различающуюся экспрессию в сравниваемых группах (log2FoldChange > |1|, padj < 0,05) и 2 102 – были соотнесены с биологическими процессами в терминах генной онтологии GO.

Для визуализации различий в величине ДЭ 100 наиболее значимо отличающихся генов между контрольной и экспериментальной группами выполнена кластеризация, результаты которой представлены в виде тепловой карты на рис. 1.

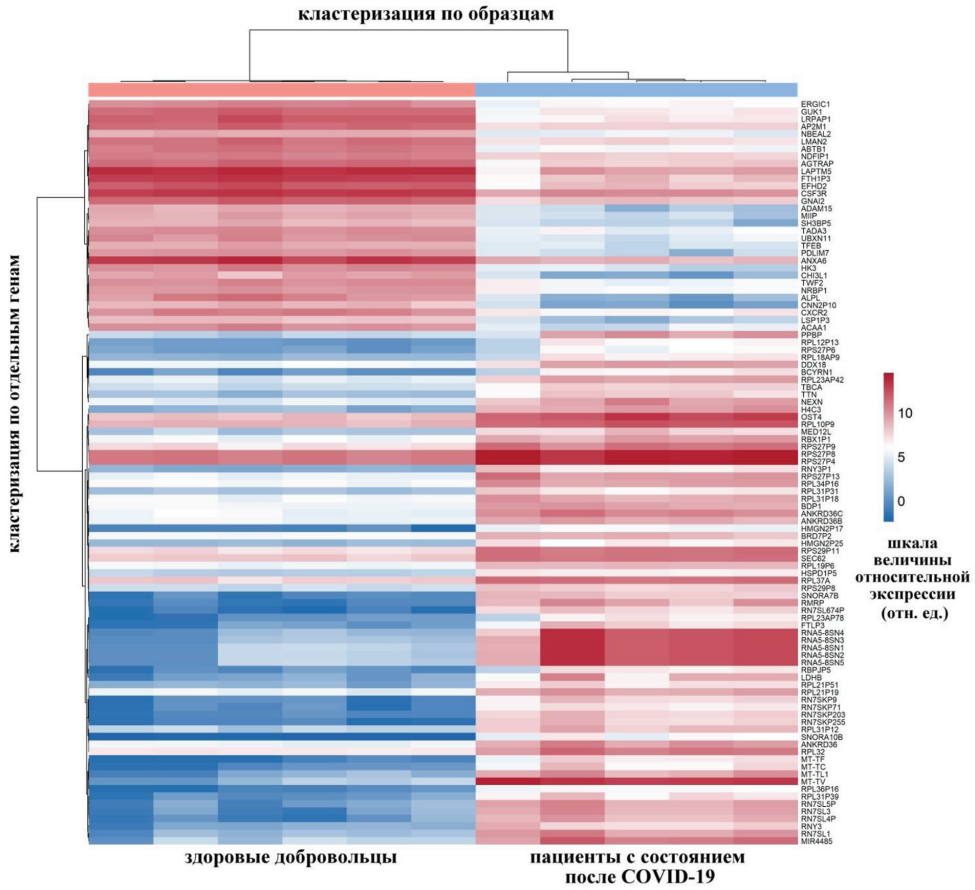


Рис. 1. Кластеризация образцов здоровых добровольцев и пациентов с состоянием после COVID-19 по величине ДЭ 100 наиболее значимо различающихся генов

Fig. 1. Clustering of samples of control group and group of long COVID patients by expression of 100 significantly different genes

Обзорный рис. 1 отображает степень различия в величине экспрессии 100 выбранных генов как между отдельными образцами, так и между двумя рассматриваемыми группами. Для контрольной и экспериментальной групп характерны незначительные различия между образцами, что приводит к образованию визуально различимых паттернов. В частности, для большинства из 100 рассматриваемых генов характерно увеличение экспрессии в МНК периферической крови пациентов с состоянием после COVID-19 по сравнению с контрольной группой. Более детальный анализ различий в экспрессии 100 наиболее значимо различающихся генов у пациентов с состоянием после COVID-19 представлен на рис. 2.

На рис. 2 гены сгруппированы в соответствии с величиной изменения их экспрессии, что отражает показатель log2 FoldChange (0 – отсутствие различий, 2 – увеличение в 4 (22) раза, –2 – уменьшение в 4 раза), и значимости выявленных различий (модуль десятичного логарифма скорректированного значения показателя уровня значимости (p-adjusted)).

Из 100 наиболее отличающихся генов между группами 44 гена ответственны за кодирование белков, включая ферменты гуанилаткиназу, металлопротеиназу, щелочную фосфатазу и лактатдегидрогеназу; 4 гена кодируют митохондриальные транспортные РНК для транспортировки валина, лейцина, фенилаланина и цистеина, 13 – малые некодирующие РНК; 39 генов представляют собой псевдогены. Следует отметить, что гены могут иметь несколько выполняемых функций.

Информация о функциях отдельных генов позволяет объединить их в группы на основе сходства выполняемых функций, что повышает качество анализа данных.

Установлено значимое снижение ДЭ у пациентов с состоянием после COVID-19 (log2FoldChange – от –3,41 до –10,79, log10(p-adjusted) – от –9,2 до –13,3) для 31 гена, из них

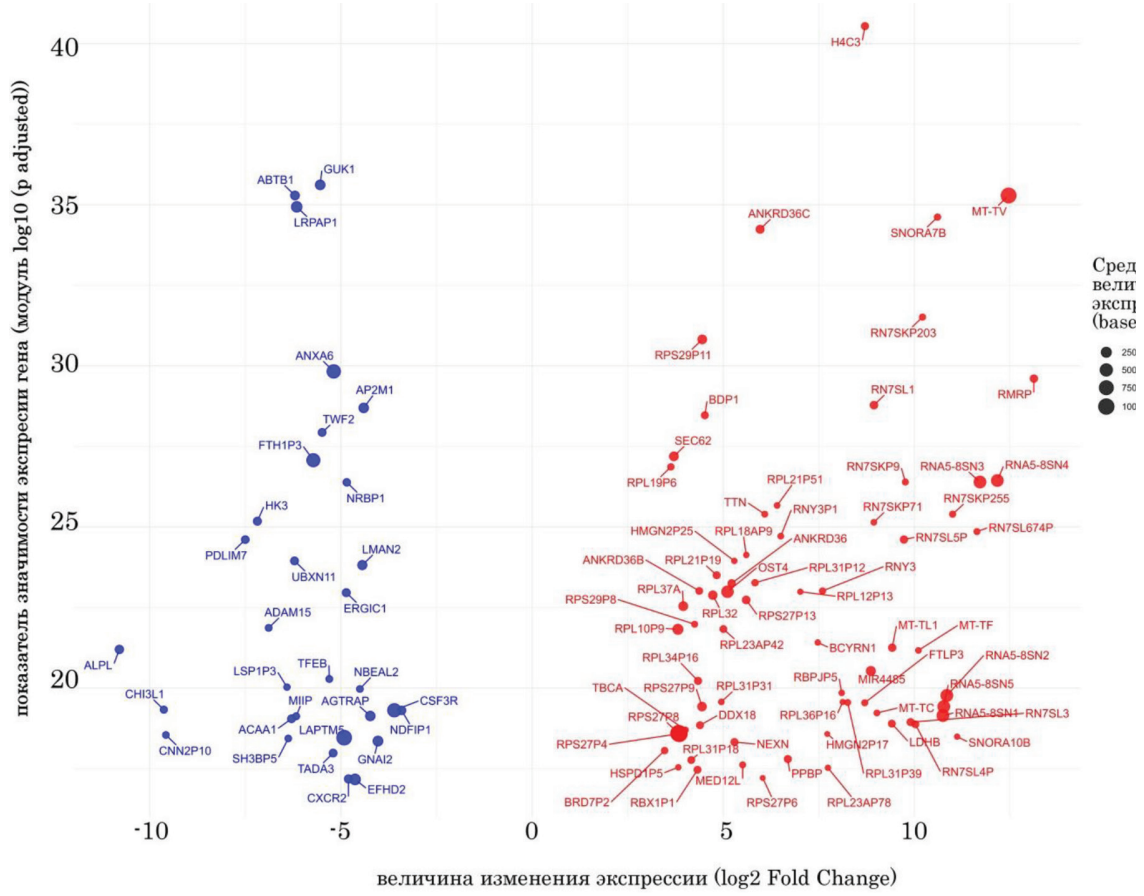


Рис. 2. Визуализация ДЭ 100 значимо различающихся генов у пациентов с состоянием после COVID-19: точки слева – гены со сниженной экспрессией, точки справа – гены с повышенной экспрессией; размер точек пропорционален базовому уровню экспрессии гена (baseMean)

Fig. 2. Visualization of differential expression of 100 significantly different genes in long COVID patients: points (left) – genes with decreased expression, points (right) – genes with increased expression; the size of the dots is proportional to the baseline gene expression level (baseMean)

28 относят к генам, кодирующим белки, которые связаны с внутриклеточным транспортом, эндоцитозом, фагоцитозом (*AP2M1*, *LAPTM5*, *LMAN2*, *LRPAP1*, *TFEB*, *ERGIC1*, *NRBP1*, *ANXA6*), адгезией, миграцией и хемотаксисом лейкоцитов (*ADAM15*, *CSF3R*, *CXCR2*, *PDLIM7*, *MIIP*, *EFHD2*), автофагией и протеолизом (*LAPTM5*, *GNAI2*, *NDFIP1, TFEB*, *UBXN11*, *TWF2*), иммунным ответом, пролиферацией и активацией лейкоцитов (*LAPTM5*, *NDFIP1*, *ABTB1*, *CHI3L1*), метаболизмом нуклеотидов, и жирных кислот (*GUK1*, *ACAA1*, *HK3*), метаболизмом белков (*LAPTM5*, *SH3BP5*, *TADA3*, *TWF2*, *NDFIP1*, *NBEAL2*) и индуцированным холодом термогенезом (*ALPL*).

Повышенный уровень ДЭ (log2FoldChange – от 3,47 до 13,12, log10(p-adjusted) – от 9,2 до 14,2) отмечен для 69 генов из 100: 16 генов кодируют белки, участвующие в метаболизме белков (*RPL32*, *RPL37A*, *BDP1*, *H4C3*, *TTN*, *DDX18*, *SEC62*, *TBCA*, *OST4*), сборке рибосом (*DDX18*), метаболизме нуклеотидов (*LDHB*), миграции и хемотаксисе лейкоцитов (*PPBP*, *NEXN*), транскрипционной коактивации генов (*MED12L*) и ингибировании активности ионных каналов (*ANKRD36*, *ANKRD36B*, *ANKRD36C*).

Помимо этого отмечается снижение уровня ДЭ псевдогенов *FTH1P3*, *CNN2P10*, *LSP1P3* и ее повышение для митохондриальных тРНК (*MT-TV*, *MT-TL1*, *MT-TF*, *MT-TC*), 13 генов малых некодирующих РНК (*SNORA7B*, *SNORA10B*, *RMRP*, *RN7SL1*, *RN7SL3*, *RNA5-8SN1*, *RNA5-8SN2*, *RNA5-8SN3*, *RNA5-8SN4*, *RNA5-8SN5, RNY3*, *BCYRN1*, *MIR4485*) и 36 псевдогенов (*RN7SKP203*, *RN7SKP9*, *RN7SKP255*, *RN7SKP71*, *RN7SL674P*, *RN7SL4P*, *RN7SL5P*, *RNY3P1*, *RPS29P11*, *RPS29P8*, *RPL19P6*, *RPL21P51*, *RPL21P19*, *RPL31P12*, *RPL31P18*, *RPL31P31*, *RPL31P39*, *RPL12P13*, *RPS27P13*, *RPS27P9*,

RPS27P8, *RPS27P6*, *RPS27P4*, *RPL23AP42*, *RPL23AP78*, *RPL10P9*, *RPL18AP9*, *RPL34P16*, *RPL36P16*, *FTLP3*, *HMGN2P25*, *HMGN2P17*, *BRD7P2*, *HSPD1P5*, *RBX1P1*, *RBPJP5*).

Следует отметить, что полученные значения величины изменения экспрессии (log2FoldChange) для рассматриваемых генов не связаны с наличием экстремально высокого или низкого числа прочтений для одного из образцов в экспериментальной или контрольной группах.

Анализ ДЭ генов с последующей группировкой в соответствии с их функциями позволяет определить общее направление изменения активности выявленных функций рассматриваемых генов, что особенно актуально при относительно невысоком количестве дифференциально экспрессирующихся генов, что возможно в случае низкого выхода данных при секвенировании транскриптома или анализе данных экспрессии относительно небольшого числа генов.

При работе с большим количеством дифференциально экспрессирующихся генов, имеющих различные функции, описанный выше подход перестает работать вследствие увеличения числа параметров для анализа, что требует упрощения структуры анализируемых данных в соответствии с участием отдельных генов в выполнении биологических процессов (БП).

Использование пакета clusterProfiler позволяет провести анализ обогащения дифференциально экспрессирующихся генов по функциональной принадлежности (GSEA-анализ), что дает возможность оценить направление изменения активности процессов в рассматриваемых клетках. Общее направление изменения активности БП определяли как отношение количества генов с повышенной ДЭ к количеству генов со сниженной ДЭ: результат >1 трактовали как активацию БП, а <1 – как снижение активности БП. В результате установлено участие 2 102 из 5 309 дифференциально экспрессирующихся генов в 163 БП в терминах Gene Ontology: из них 146 процессов характеризуются сниженной ДЭ генов, а 17 – повышенной ДЭ генов. Выявленные в результате GSEA-анализа БП содержат от 7 до 147 генов (60,14 ± 2,56 гена/процесс). Визуализация результатов GSEA-анализа для БП, содержащих более 70 генов, представлена на рис. 3.

Среди 65 БП, отображенных на рис. 3, у 61 наблюдается снижение ДЭ генов, что подтверждает угнетение выявленных БП у пациентов с состоянием после COVID-19. Для более детального анализа выполнена группировка БП с помощью онлайн-ресурса REViGO, полученные данные были использованы для создания функциональной сети БП в CytoScape (рис. 4).

Представленная на рис. 4 сеть позволяет выделить 12 групп БП, связанных с энергетическим обменом, врожденным и адаптивным иммунитетом, автофагией, протеолизом, апоптозом, вирусными процессами (включая проникновение вирусов в клетки и репликацию вирусов), биосинтезом нуклеотидов, репарацией повреждений ДНК, модификацией РНК, процессингом РНК и сборкой рибосом, регуляцией сборки, модификации и стабильности белков, а также регуляцией локализации белков и органелл.

К группам БП, связанным с процессингом РНК и сборкой рибосом (4 БП), производством энергии (4 БП) и регуляцией протеолиза (3 БП), принадлежали 11 из 17 БП с повышенной ДЭ генов, оставшиеся БП ассоциированы с процессами трансляции в цитоплазме (GO:0002181), транспортом белков в ядро (GO:0006607), формированием ДНК-белковых комплексов (GO:0071824) и нуклеосом (GO:0034728), и расслаблением сердечной мускулатуры (GO:0055119).

Анализируя изменение активности метаболических и энергетических процессов, можно сделать вывод об их десинхронизации: МНК исследуемых пациентов с состоянием после COVID-19 потенциально могут производить больше обычного энергии (за счет активации окислительного фосфорилирования в митохондриях), активно формировать рибосомы и синтезировать белок на фоне снижения активности процессов протеолиза. Аналогичное повышение активности процессов биогенеза рибосом и окислительного фосфорилирования в транскриптоме МНК обнаружено у пациентов с состоянием после COVID-19 и интерстициальной болезнью лёгких [11]. Изменение активности биогенеза рибосом оказывает влияние на процесс врожденного иммунного ответа на вирусные инфекции, в частности увеличение количества активно работающих рибосом может способствовать ускорению синтеза интерферона и дальнейшему образованию антител.

Наблюдаемое снижение биосинтеза нуклеотидов, пролиферативной активности клеток, репарации повреждений ДНК и активации апоптоза может указывать на возможную связь с замедлением клеточного цикла и потенциальным переходом клеток в дифференцированное

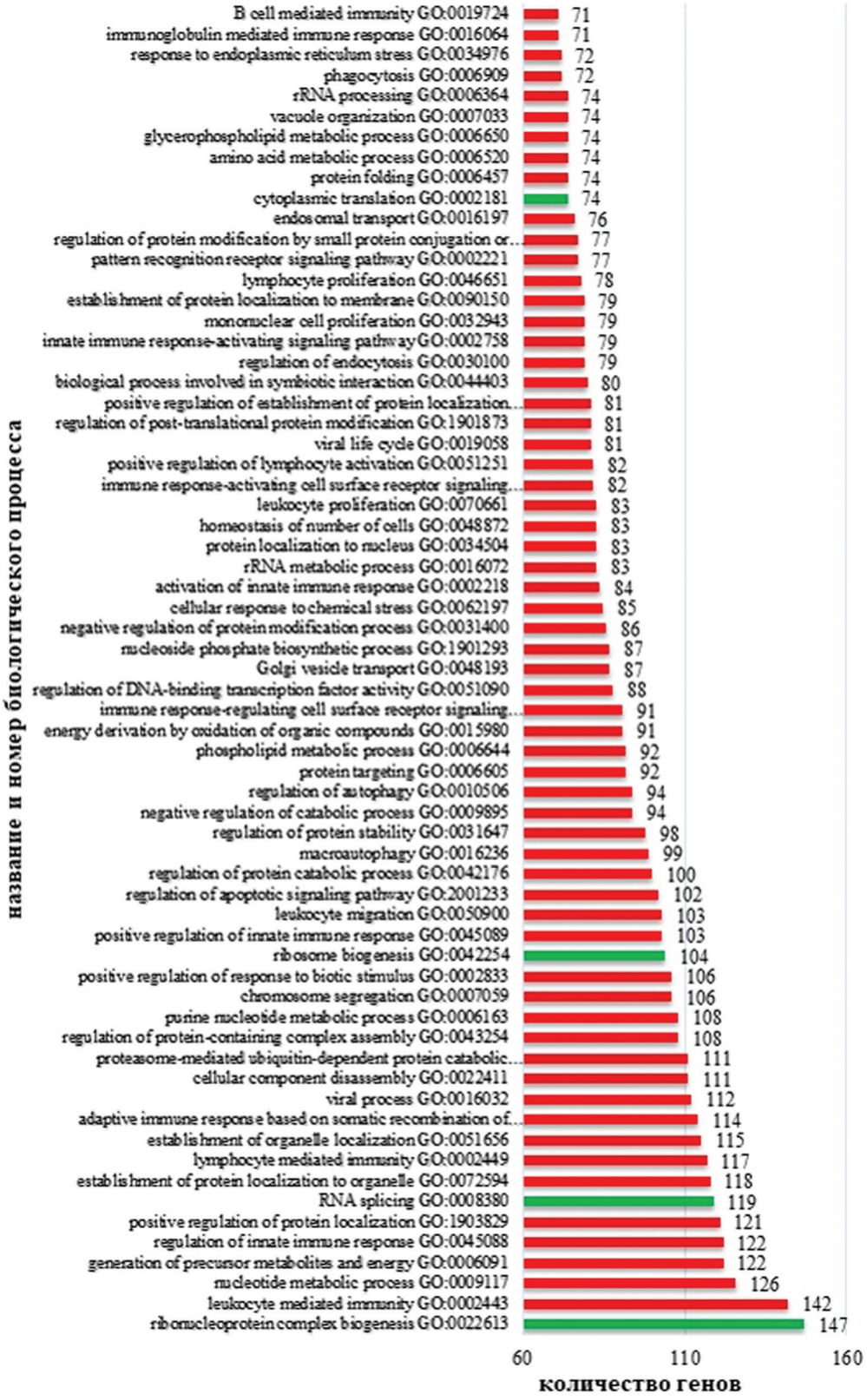


Рис. 3. Характеристика БП, содержащих более 70 генов (n = 65), по результатам GSEA-анализа: красным цветом (светлым тоном) выделены БП со сниженной ДЭ генов, зеленым (темным тоном) – БП с повышенной ДЭ генов. Подписи по оси ординат представлены в виде имени и номера БП в терминах Gene Ontology

Fig. 3. Characterization of biological processes (BPs) containing more than 70 genes (n = 65) based on GSEA analysis: BPs with reduced gene expression are highlighted in red (light tone), BPs with increased gene expression are highlighted in green (dark tone). The ordinate axis labels are the BP name and number in Gene Ontology terms

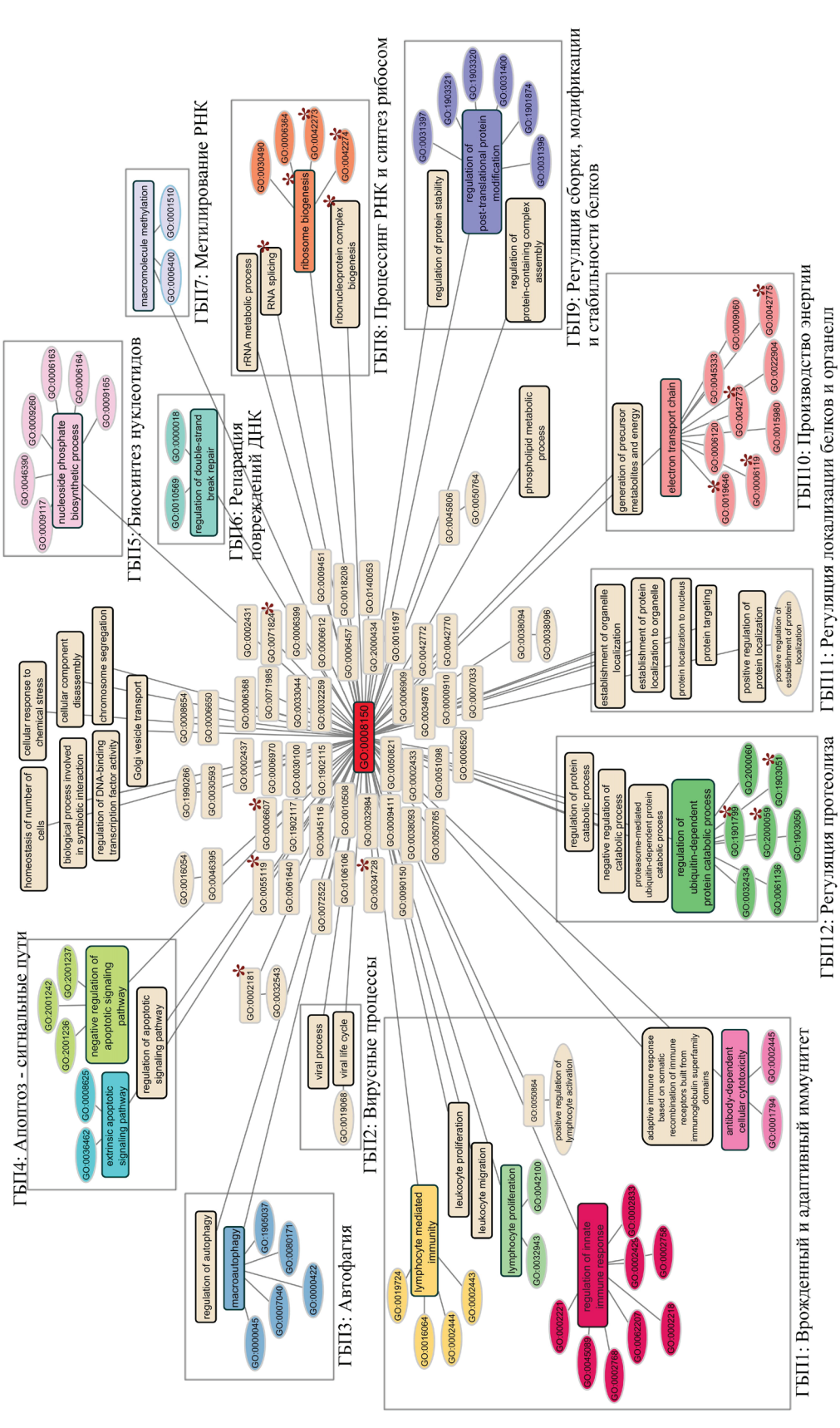


Рис. 4. Основные группы БП, содержащих дифференциально экспрессирующиеся гены у пациентов с состоянием после COVID-19 (прямоугольник – материнские (группирующие) и одиночные БП; овал – дочерние БП; центральный узел –базовый процесс GO:0008150 и БП, имеющие 2 и более дочерних БП; названия указаны для материнских БП и БП с числом участвующих генов более 80; * – БП с повышенной ДЭ генов)

Fig. 4. Major groups of BPs containing differentially expressed genes in patients with long COVID (rectangle – parent (grouping) and single BPs; oval – daughter BPs; central node – indicates the core process GO:0008150 and BPs with two or more daughter BPs; names are given for parent BPs and BPs with more than 80 involved genes; * – BPs with increased differential gene expression)

состояние и увеличением количества клеток с накопившимися повреждениями ДНК, возникшими в результате развития состояния после COVID-19. Снижение активности деления клеток было подтверждено для моноцитов при исследовании транскриптома МНК методом секвенирования РНК отдельных клеток у 44 пациентов с состоянием после COVID-19 вместе со снижением экспрессии генов, связанных с воспалением, активностью инфламмасомы на фоне активации синтеза АТФ (аденозинтрифосфата) [12]. У пациентов с состоянием после COVID-19 также отмечено изменение экспрессии генов, ассоциированных с продукцией интерферона [13], клеточным циклом, иммунной дисрегуляцией и модификациями гистонов [14].

Также следует отметить снижение активности БП, связанных с врожденным и адаптивным иммунитетом, включая сигнальные пути, ассоциированные с протеканием воспалительных процессов. Однако часть генов, участвующих в PRR- и FcR-воспалительных путях (*TLR2*, *FCGR1BP*, *FCER1G*, *HMGB1*), имеет повышенный уровень ДЭ у пациентов с состоянием после COVID-19, что может указывать на наличие хронических воспалительных процессов в части клеток исследуемой популяции. В работе S. Fineschi et al. отмечено повышение экспрессии генов, участвующих в JAK-STAT- и IL9-сигнальных путях связанных с воспалительными процессами, а также снижение активности процессов протеолиза, вирус-ассоциированных процессов [15].

Таким образом, в результате анализа БП подтверждается сделанный на основании анализа изменения ДЭ 100 генов вывод о снижении функциональной активности МНК пациентов с состоянием после COVID-19.

Проведенное исследование является примером системного подхода к анализу результатов и позволяет на основе данных о ДЭ генов оценить характер изменения экспрессии отдельных генов и их комплексов, определить перечень и направление протекания БП в МНК периферической крови пациентов с состоянием после COVID-19, однако связь выявленных изменений с индивидуальными клиническими проявлениями исследуемой патологии требует дальнейшего системного анализа на более высоком уровне.

Заключение. В ходе пилотного исследования транскриптома МНК периферической крови пациентов с состоянием после COVID-19, проведенного впервые в Республике Беларусь методом НС, были выявлены особенности экспрессии генов (n = 2 102), участвующих в 163 биологических процессах. В исследуемой когорте прослеживаются тенденции к изменению функционального статуса МНК, которые могут свидетельствовать о потенциальном снижении пролиферативной активности и интенсивности процессов врожденного и адаптивного иммунитета, а также о возможных метаболических сдвигах в сторону активации биогенеза рибосом, окислительного фосфорилирования и подавления протеолиза.

В связи с малым объемом выборки полученные результаты следует рассматривать как предварительные. Выявленные паттерны экспрессии не могут служить окончательным доказательством конкретных молекулярных механизмов заболевания, однако они открывают направления для дальнейших крупномасштабных исследований, направленных на поиск диагностических биомаркеров и терапевтических мишеней при состоянии после COVID-19.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список использованных источников

1. Molecular and biological characterization of messenger RNA / F. Gros, W. Gilbert, H. H. Hiatt [et al.] // Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology. – 1961. – Vol. 26. – P. 111–132. https://doi.org/10.1101/sqb.1961.026.01.016

2. McGettigan, P. A. Transcriptomics in the RNA-seq era / P. A. McGettigan // Current Opinion in Chemical Biology. – 2013. – Vol. 17, N 1. – P. 4–11. https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2012.12.008

3. Serial Analysis of Gene Expression / V. E. Velculescu, L. Zhang, B. Vogelstein, K. Kinzler // Science. – 1995. – Vol. 270, N 5235. – P. 484–487. https://doi.org/10.1126/science.270.5235.484

4. Niemitz, E. The microarray revolution / E. Niemitz // Nature Reviews Genetics. – 2007. – Vol. 8, Suppl. 1. – P. S15. https://doi.org/10.1038/nrg2259

5. Comparison of Next-Generation Sequencing Systems / L. Liu, Y. Li, S. Li [et al.] // Journal of Biomedicine and Biotechnology. – 2012. – Vol. 2012. – Art. 251364. https://doi.org/10.1155/2012/251364

6. Long-read RNA sequencing: A transformative technology for exploring transcriptome complexity in human diseases / I. H. Ament, N. DeBruyne, F. Wang, L. Lin // Molecular Therapy. – 2025. – Vol. 33, N 3. – P. 883–894. https://doi.org/10.1016/j.ymthe.2024.11.025

7. A transcriptomics approach to expand therapeutic options and optimize clinical trials in oncology / V. Lazar, B. Zhang, S. Magidi [et al.] // Therapeutic Advances in Medical Oncology. – 2023. – Vol. 15. – Art. 17588359231156382. https://doi.org/10.1177/17588359231156382

8. Clinical applications of and molecular insights from RNA sequencing in a rare disease cohort / J. C. Stark, N. Pipko, Y. Liang [et al.] // Genome Medicine. – 2025. – Vol. 17, N 1. – Art. 72. https://doi.org/10.1186/s13073–025–01494–w

9. Personalized medicine for rare neurogenetic disorders: can we make it happen? / A. M. van Eeghen, H. Bruining, N. I. Wolf [et al.] // Cold Spring Harbor molecular case studies. – 2022. – Vol. 8, N 2. – Art. a006200. https://doi.org/10.1101/mcs.a006200

10. Спектр нейропсихологических нарушений у пациентов с постковидным синдромом / Н. В. Галиновская, И. О. Стома, Е. В. Воропаев [и др.] // Неврология и Нейрохирургия. Восточная Европа. – 2024. – Т. 14, № 3. – С. 323–334.

11. Transcriptomic Profiling of Long COVID-19 in Patients with Interstitial Lung Disease Reveals Dysregulation of Mitochondrial Oxidative Phosphorylation / K. A. Aracena, G. C. Nwankwo, C. T. Lee [et al.] // American Journal of Respiratory Cell and Molecular Biology. – 2025. – Vol. 73, N 4. – P. 634–637. https://doi.org/10.1165/rcmb.2024-0595le

12. Transcriptome analysis of classical blood cells reveals downregulation of pro-inflammatory genes in the classical monocytes of long COVID patients / F. Fricke, F. Mai, C. Wossidlo [et al.] // Frontiers in Immunology. – 2025. – Vol. 16. – Art. 1710783. https://doi.org/10.3389/fimmu.2025.1710783

13. Bulk RNA sequencing for analysis of post COVID-19 condition in adolescents and young adults / S. L. Sommen, Z. Zhao, S. Segtnan [et al.] // Journal of Translational Medicine. – 2024. – Vol. 22, N 1. – Art. 312. https://doi.org/10.1186/s12967-024-05117-7

14. Towards understanding post-COVID-19 condition: A systematic meta-analysis of transcriptomic alterations with sex-specific insights / E. C. Rusu, P. Monfor-Lanzas, L. Bertran [et al.] // Computers in Biology and Medicine. – 2024. – Vol. 175. – Art. 108507. https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2024.108507

15. Comprehensive transcriptome assessment in PBMCs of post-COVID patients at a median follow-up of 28 months after a mild COVID infection reveals upregulation of JAK/STAT signaling and a prolonged immune response / S. Fineschi, J. Klar, J. R. Lopez Egido [et al.] // Frontiers in Immunology. – 2025. – Vol. 16. – Art. 1589589. https://doi.org/10.3389/fimmu.2025.1589589

References

1. Gros F., Gilbert W., Hiatt H. H., Attardi G., Spahr P. F., Watson J. D. Molecular and biological characterization of messenger RNA. *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology*, 1961, vol. 26, pp. 111–132. https://doi.org/10.1101/sqb.1961.026.01.016

2. McGettigan P. A. Transcriptomics in the RNA-seq era. *Current Opinion in Chemical Biology*, 2013, vol. 17, no. 1, pp. 4–11. https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2012.12.008

3. Velculescu V. E., Zhang L., Vogelstein B., Kinzler K. W. Serial Analysis of Gene Expression. *Science*, 1995, vol. 270, no. 5235, pp. 484–487. https://doi.org/10.1126/science.270.5235.484

4. Niemitz E. The microarray revolution. *Nature Reviews Genetics*, 2007, vol. 8, suppl. 1, p. S15. https://doi.org/10.1038/nrg2259

5. Liu L., Li Y., Li S., Hu N., He Y., Pong R., Lin D., Lu L., Law M. Comparison of Next-Generation Sequencing Systems. *Journal of Biomedicine and Biotechnology*, 2012, vol. 2012, art. 251364. https://doi.org/10.1155/2012/251364

6. Ament I. H., DeBruyne N., Wang F., Lin L. Long-read RNA sequencing: A transformative technology for exploring transcriptome complexity in human diseases. *Molecular Therapy*, 2025, vol. 33, no. 3, pp. 883–894. https://doi.org/10.1016/j.ymthe.2024.11.025

7. Lazar V., Zhang B., Magidi S., Le Tourneau C., Raymond E., Ducreux M. [et al.]. A transcriptomics approach to expand therapeutic options and optimize clinical trials in oncology. *Therapeutic Advances in Medical Oncology*, 2023, vol. 15, art. 17588359231156382. https://doi.org/10.1177/17588359231156382

8. Stark J. C., Pipko N., Liang Y., Szuto A., Tsoi C. T., Dickson M. A. [et al.]. Clinical applications of and molecular insights from RNA sequencing in a rare disease cohort. *Genome Medicine*, 2025, vol. 17, no. 1, art. 72. https://doi.org/10.1186/s13073–025–01494–w

9. van Eeghen A. M., Bruining H., Wolf N. I., Bergen A. A., Houtkooper R. H., van Haelst M. M., van Karnebeek C. D. Personalized medicine for rare neurogenetic disorders: can we make it happen? *Cold Spring Harbor Molecular Case Studies*, 2022, vol. 8, no. 2, art. a006200. https://doi.org/10.1101/mcs.a006200

10. Galinovskaya N. V., Stoma I. O., Voropaev E. V., Barbarovich A. A., Bobovich N. V., Osipkina O. V. Spectrum of Neuropsychological Abnormalities in Patients with Post-COVID Syndrome. *Nevrologiya i neirokhirurgiya. Vostochnaya Evropa = Neurology and Neurosurgery Eastern Europe*, 2024, vol. 14, no. 3, pp. 323–334 (in Russian).

11. Aracena K. A., Nwankwo G. C., Lee C. T., Karnik R., Ventura I., Douglas D., Udofia I., Chen M., Chelala L., Im H. K., Strek M. E. Transcriptomic Profiling of Long COVID-19 in Patients with Interstitial Lung Disease Reveals Dysregulation of Mitochondrial Oxidative Phosphorylation. *American Journal of Respiratory Cell and Molecular Biology*, 2025, vol. 73, no. 4, pp. 634–637. https://doi.org/10.1165/rcmb.2024–0595LE

12. Fricke F., Mai F., Wossidlo C., Steinbeck F., Bergmann-Ewert W., Kordt M., Kraft K., Műller B., Reisinger E. C., Műller-Hilke B. Transcriptome analysis of classical blood cells reveals downregulation of pro-inflammatory genes in the classical monocytes of long COVID patients. *Frontiers in Immunology*, 2025, vol. 16, art. 1710783. https://doi.org/10.3389/fimmu.2025.1710783

13. Sommen S. L., Zhao Z., Segtnan S., Stiansen-Sonerud T., Selvakumar J., Beier Havdal L., Gjerstad J., Wyller V. B. B., Lund Berven L. Bulk RNA sequencing for analysis of post COVID–19 condition in adolescents and young adults. *Journal of Translational Medicine*, 2024, vol. 22, no. 1, art. 312. https://doi.org/10.1186/s12967-024-05117-7

14. Rusu E. C., Monfor-Lanzas P., Bertran L., Barrientos-Riosalido A., Solé E., Mahmoudian R., Aguilar C., Briansó S., Mohamed F., Garcia S., Camaron J., Auguet T. Towards understanding post-COVID-19 condition: A systematic meta-analysis of transcriptomic alterations with sex-specific insights. *Computers in Biology and Medicine*, 2024, vol. 175, art. 108507. https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2024.108507

15. Fineschi S., Klar J., Lopez Egido J. R., Schuster J., Bergquist J., Kaden R., Dahl N. Comprehensive transcriptome assessment in PBMCs of post-COVID patients at a median follow-up of 28 months after a mild COVID infection reveals up-regulation of JAK/STAT signaling and a prolonged immune response. *Frontiers in Immunology*, 2025, vol. 16, art. 1589589. https://doi.org/10.3389/fimmu.2025.1589589

Информация об авторах

Шафорост Александр Сергеевич – ст. науч. сотрудник. Гомельский государственный медицинский университет (ул. Ланге, 5, 246000, г. Гомель, Республика Беларусь). E-mail: asofocl@mail.ru. https://orcid.org/0000-0002-6725-5353

Воропаев Евгений Викторович – канд. мед. наук, доцент, проректор по научной работе. Гомельский государственный медицинский университет (ул. Ланге, 5, 246000, г. Гомель, Республика Беларусь). E-mail: voropaev.evgenii@gmail.com. https://orcid.org/0000-0002-9435-6109

Галиновская Наталья Викторовна – д-р мед. наук, профессор, декан. Гомельский государственный медицинский университет (ул. Ланге, 5, 246000, г. Гомель, Республика Беларусь). E-mail: halinouskaya@gsmu.by. https://orcid.org/0000-0002-1706-0144

Зятьков Алексей Александрович – ст. науч. сотрудник. Гомельский государственный медицинский университет (ул. Ланге, 5, 246000, г. Гомель, Республика Беларусь). E-mail: ziatskovaa@gmail.com. https://orcid.org/0000-0001-9542-3791

Осипкина Ольга Викторовна – заведующий лабораторией. Гомельский государственный медицинский университет (ул. Ланге, 5, 246000, г. Гомель, Республика Беларусь). E-mail: olga.osipkina@mail.ru. https://orcid.org/0000-0002-1931-4224

Барбарович Анастасия Александровна – ассистент кафедры. Гомельский государственный медицинский университет (ул. Ланге, 5, 246000, г. Гомель, Республика Беларусь). E-mail: Feniks-1342@mail.ru. https://orcid.org/0000-0003-4360-4341

Information about the authors

Alexander S. Shaforost – Senior Researcher. Gomel State Medical University (5, Lange Str., 246000, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: asofocl@mail.ru. https://orcid.org/0000-0002-6725-5353

Evgenii V. Voropaev – Ph. D. (Med.), Associate Professor, Vice-Rector for Research. Gomel State Medical University (5, Lange Str., 246000, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: voropaev.evgenii@gmail.com. https://orcid.org/0000-0002-9435-6109

Natallia V. Halinouskaya – D. Sc. (Med.), Professor, Dean. Gomel State Medical University (5, Lange Str., 246000, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: halinouskaya@gsmu.by. https://orcid.org/0000-0002-1706-0144

Aliaksei A. Ziatskov – Senior Researcher. Gomel State Medical University (5, Lange Str., 246000, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: ziatskovaa@gmail.com. https://orcid.org/0000-0001-9542-3791

Olga V. Osipkina – Head of the Laboratory. Gomel State Medical University (5, Lange Str., 246000, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: olga.osipkina@mail.ru. https://orcid.org/0000-0002-1931-4224

Anastasia A. Barbarovich – Assistant at the Department. Gomel State Medical University (5, Lange Str., 246000, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: Feniks-1342@mail.ru. https://orcid.org/0000-0003-4360-4341

ISSN 1029-8940 (Print)
ISSN 2524-230X (Online)
УДК 594.3:591.436:661.72
https://doi.org/10.29235/1029-8940-2026-71-4-344-352

Поступила в редакцию 22.04.2026
Received 22.04.2026

М. В. Вишневская, П. Ю. Пинчук, А. А. Чиркин

Витебский государственный университет имени П. М. Машерова, Витебск, Республика Беларусь

МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ГЕПАТОПАНКРЕАСА ПРЕСНОВОДНЫХ МОЛЛЮСКОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ АЛИФАТИЧЕСКИХ СПИРТОВ С РАЗНОЙ ДЛИНОЙ УГЛЕРОДНОЙ ЦЕПИ

Аннотация. Алифатические спирты относятся к факторам антропогенного загрязнения водных экосистем. Структурные изменения гепатопанкреаса лёгочных пресноводных моллюсков под их воздействием остаются недостаточно изученными. В работе проведена сравнительная оценка морфологических изменений гепатопанкреаса у катушки роговой (*Planorbarius corneus* L.) и прудовика обыкновенного (*Lymnaea stagnalis* L.) при остром воздействии алифатических спиртов с различной длиной углеродной цепи (C_1–C_6).

Эксперимент включал экспозицию в течение 1 ч к растворам метанола, этанола, изопропанола, бутанола-1 и гексанола-1 с последующим 48-часовым периодом восстановления. Установлено, что степень морфологических изменений гепатопанкреаса зависела от концентрации и вида спирта. Наиболее выраженные изменения отмечены при воздействии изопропанола, бутанола-1 и гексанола-1. Катушка роговая более устойчива к воздействию спиртов и активнее выделяет слизь, тогда как у прудовика обыкновенного этанол стимулирует репродуктивную активность.

Полученные результаты подтверждают высокую чувствительность гепатопанкреаса пресноводных моллюсков к алифатическим спиртам. Это обосновывает использование морфологических изменений гепатопанкреаса в качестве биомаркера экотоксикологического мониторинга водных экосистем.

Ключевые слова: экотоксикологический мониторинг, метанол, этанол, изопропанол, бутанол-1, гексанол-1, *Lymnaea stagnalis* L., *Planorbarius corneus* L., гистологические повреждения, биомаркеры

Для цитирования: Вишневская, М. В. Морфологические изменения гепатопанкреаса пресноводных моллюсков при воздействии алифатических спиртов с разной длиной углеродной цепи / М. В. Вишневская, П. Ю. Пинчук, А. А. Чиркин // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя біялагічных навук. – 2026. – Т. 71, № 4. – С. 344–352. https://doi.org/10.29235/1029-8940-2026-71-4-344-352

Maria V. Vishnevskaya, Polina Yu. Pinchuk, Alexander A. Chirkin

Vitebsk State University named after P. M. Masherov, Vitebsk, Republic of Belarus

MORPHOLOGICAL CHANGES IN THE HEPATOPANCREAS OF FRESHWATER MOLLUSKS EXPOSED TO ALIPHATIC ALCOHOLS WITH DIFFERENT CARBON CHAIN LENGTHS

Abstract. Aliphatic alcohols are among the factors of anthropogenic pollution of aquatic ecosystems. Structural changes in the hepatopancreas of pulmonate freshwater mollusks under their exposure remain insufficiently studied. In this work, a comparative assessment of morphological changes in the hepatopancreas of the ramshorn snail (*Planorbarius corneus* L.) and the great pond snail (*Lymnaea stagnalis* L.) was performed following acute exposure to aliphatic alcohols with different carbon chain lengths (C_1–C_6).

The experiment involved a one-hour exposure to solutions of methanol, ethanol, isopropanol, butanol-1, and hexanol-1, followed by a 48-hour recovery period. The degree of morphological changes in the hepatopancreas was found to depend on the concentration and type of alcohol. The most pronounced changes were observed following exposure to isopropanol, butanol-1, and hexanol-1. The ramshorn snail was more resistant to alcohol exposure and secreted more mucus, whereas in the great pond snail ethanol stimulated reproductive activity.

The obtained results confirm the high sensitivity of the hepatopancreas of freshwater mollusks to aliphatic alcohols. This justifies the use of morphological changes in the hepatopancreas as a biomarker for the ecotoxicological monitoring of aquatic ecosystems.

Keywords: ecotoxicological monitoring, methanol, ethanol, isopropanol, butanol-1, hexanol-1, *Planorbarius corneus* L., *Lymnaea stagnalis* L., histological damage, biomarkers

For citation: Vishnevskaya M. V., Pinchuk P. Yu., Chirkin A. A. Morphological changes in the hepatopancreas of freshwater mollusks exposed to aliphatic alcohols with different carbon chain lengths. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya biyalagichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological series*, 2026, vol. 71, no. 4, pp. 344–352 (in Russian). https://doi.org/10.29235/1029-8940-2026-71-4-344-352

© Вишневская М. В., Пинчук П. Ю., Чиркин А. А., 2026

Введение. В Республике Беларусь легочные пресноводные моллюски давно выполняют роль модельных организмов. На них изучают организацию нервных центров [1, 2], исследуют процессы радиоадаптации в загрязненных водоемах [3]. Антиоксидантные системы этих животных – маркеры при воздействии стрессовых факторов [4]. Используя моллюсков, оценивают влияние тяжелых металлов на жизнеспособность гидробионтов [5]. Наряду с этим проводят биоэкологическую оценку состояния поверхностных вод и моделируют нарушения обмена аминокислот и глюкозы [6]. Особенно часто используют два вида – катушку роговую (*Planorbarius corneus* L.) и прудовика обыкновенного (*Lymnaea stagnalis* L.). Они удобны для лабораторного содержания и дают воспроизводимые результаты.

Гепатопанкреас лёгочных пресноводных моллюсков участвует в переваривании пищи, детоксикации ксенобиотиков, а также в транспорте веществ гемолимфой. Кроме того, он играет важную роль в регуляции обмена веществ, в том числе под воздействием пептидов [7]. Такой спектр функциональной активности гепатопанкреаса делает его важным органом-мишенью для экотоксикологических исследований [8].

В последние десятилетия антропогенная нагрузка на водные экосистемы существенно возросла вследствие поступления органических растворителей, в том числе алифатических спиртов [9]. Основные источники их появления в водоемах – сточные воды химических, фармацевтических и целлюлозно-бумажных производств. Метанол и этанол поступают также со стоками спиртовых заводов и очистных сооружений. Изопропанол, бутанол и гексанол часто обнаруживаются в сточных водах предприятий по производству пластмасс, синтетических смол и лакокрасочных материалов [10].

Воздействие алифатических спиртов вызывает у гидробионтов развитие окислительного стресса и нарушения энергетического обмена, что сопровождается повреждением клеточных структур и активацией процессов клеточной гибели [11]. На тканевом уровне наиболее выраженные изменения наблюдаются в органах, участвующих в метаболизме и накоплении ксенобиотиков, в частности в гепатопанкреасе [12]. Увеличение длины углеродной цепи алифатических спиртов, как правило, сопровождается повышением их липофильности. Это может влиять на взаимодействие соединений с биологическими мембранами и выраженность их токсического действия. Для ряда алифатических спиртов показана связь между длиной углеродной цепи и токсическим эффектом [13]. В отличие от млекопитающих, для гидробионтов зависимость токсичности спиртов от длины цепи мало изучена. В единичных работах приведены данные о влиянии этанола на репродуктивные показатели пресноводных моллюсков, однако они не включают гистологический анализ тканей [14]. Токсические эффекты метанола подробно изучены на рыбах и некоторых беспозвоночных животных, где описаны нарушения роста, питания и структуры тканей [15]. Для моллюсков эти данные остаются недостаточно изученными.

Токсическое воздействие алифатических спиртов на гидробионтов связано не только с их мембранотропными эффектами, но и с образованием активных форм кислорода в процессе метаболизма. Окисление спиртов алкогольдегидрогеназой и альдегиддегидрогеназой приводит к накоплению токсичных альдегидов и генерации супероксидного радикала, что запускает перекисное окисление липидов и повреждение белков [16, 17]. У моллюсков, как и у других гидробионтов, степень окислительного стресса связана с выраженностью тканевых повреждений, однако для гепатопанкреаса легочных моллюсков такие данные практически отсутствуют. Учитывая то, что гепатопанкреас является центральным органом биотрансформации ксенобиотиков, его структурная целостность критична для поддержания детоксикационной функции организма. Следовательно, оценка морфологических изменений этого органа при остром воздействии спиртов может дать прямую информацию о степени токсического поражения и возможностях восстановления.

Цель исследования – сравнить морфологические изменения гепатопанкреаса и поведенческих реакций пресноводных моллюсков катушки роговой (*P. corneus* L.) и прудовика обыкновенного (*L. stagnalis* L.) при воздействии алифатических спиртов с различной длиной углеродной цепи (C_1–C_6).

Материалы и методы исследования. Объектами исследования послужили половозрелые особи двух видов легочных пресноводных моллюсков – катушки роговой (*P. corneus* L.) и прудовика обыкновенного (*L. stagnalis* L.). Всего было использовано 220 особей (110 каждого вида). Для

каждого вида моллюски были случайным образом распределены на 11 групп (n = 10 в группе): 1 контрольная и 10 экспериментальных.

Контрольные группы содержались в отстоянной водопроводной воде. Для экспериментальных групп готовили водные растворы алифатических спиртов: этанол – 1 и 5 %, изопропанол – 0,5 и 2 %, а для метанола, бутанола-1 и гексанола-1 – 0,25 и 1 %. Концентрации подбирали так, чтобы уровни сублетального воздействия были сходными, что позволило обоснованно сравнивать морфологические изменения гепатопанкреаса.

Экспозицию моллюсков проводили в пластиковых контейнерах при температуре 20 ± 1 °C в течение 1 ч. Затем моллюсков переносили в отстоянную воду без спиртов на 48 ч (период восстановления). После чего животных усыпляли и извлекали гепатопанкреас для гистологического анализа.

Образцы гепатопанкреаса фиксировали в 10%-м нейтральном формалине в течение 7 сут. После фиксации ткани промывали в проточной воде, обезвоживали в возрастающих концентрациях этанола (70, 80, 96 %), просветляли в ксилоле и заливали в парафин по стандартной методике. Срезы толщиной 5–7 мкм получали на ротационном микротоме и окрашивали гематоксилином и эозином. Микроскопическое исследование проводили с использованием светового микроскопа Levenhuk MED 45T при увеличении ×100.

Гистологические изменения гепатопанкреаса оценивали полуколичественно по 4-балльной шкале: 1 – отсутствие изменений, 2 – слабые изменения (менее 25 % ацинусов), 3 – умеренные изменения (25–50 % ацинусов), 4 – выраженные изменения (более 50 % ацинусов). Оценку проводили без учета принадлежности образцов к экспериментальным группам.

Оценку поведенческих реакций моллюсков проводили через 2 ч после переноса в отстоянную воду без спиртов. Наблюдение за каждой особью осуществляли в течение 10 мин. Оценивали двигательную активность, реакцию на механическое раздражение, слизеобразование и репродуктивную активность. Реакцию на механическое раздражение вызывали стандартным тактильным стимулом (стеклянная палочка). Слизеобразование учитывали визуально по интенсивности слизистого следа и наличию выделений. Репродуктивную активность определяли по наличию кладок в течение 48 ч восстановления. Поведенческие реакции оценивали полуколичественно по 4-балльной шкале: «–» – отсутствие проявлений, «+» – слабая выраженность, «++» – умеренная выраженность, «+++» – высокая выраженность.

Для каждой особи рассчитывали интегральный показатель повреждения как среднее арифметическое четырех морфологических признаков: расширение просветов ацинусов, накопление клеточного детрита, дезорганизация эпителия и вакуолизация цитоплазмы. Статистический анализ проводили с использованием непараметрических методов, поскольку распределение данных отличалось от нормального. Для оценки различий между группами применяли критерий Краскела – Уоллиса (Kruskal-Wallis H-test) с последующим post hoc анализом по критерию Данна (Dunn's multiple comparisons test) для множественных попарных сравнений. Различия считали статистически значимыми при $p < 0{,}05$. Статистическую обработку данных осуществляли с использованием программного пакета GraphPad Prism 5.0.

Результаты и их обсуждение. В ходе исследования установлено, что воздействие алифатических спиртов вызывает статистически значимые различия степени повреждения гепатопанкреаса у катушки роговой и прудовика обыкновенного (Kruskal-Wallis H-test, $p < 0{,}0001$). Выраженность изменений зависит от длины углеродной цепи и концентрации спирта (табл. 1).

При воздействии метанола и этанола структурные нарушения были относительно слабыми. Изопропанол, бутанол-1 и гексанол-1 вызывали более выраженные изменения, включая дезорганизацию ацинарной архитектуры. Более сильное повреждающее действие этих спиртов может быть связано с их большей липофильностью. В гомологическом ряду алифатических спиртов увеличение длины углеродной цепи сопровождается ростом коэффициента распределения октанол–вода от –0,77 для метанола до 2,03 для гексанола-1. Повышение гидрофобности способствует взаимодействию спиртов с липидными компонентами биомембран и может приводить к нарушению их структурной целостности, что соответствует литературным данным [18, 19].

Таблица 1. **Степень повреждения гепатопанкреаса катушки роговой и прудовика обыкновенного при воздействии алифатических спиртов**

Table 1. **Degree of damage to the hepatopancreas of the ramshorn snail and the great pond snail when exposed to aliphatic alcohols**

Спирт, концентрация	Катушка роговая	Прудовик обыкновенный
Контроль	1,0 ± 0,00	1,0 ± 0,00
Метанол 0,25 %	1,5 ± 0,17	1,4 ± 0,16
Метанол 1 %	1,8 ± 0,13	1,7 ± 0,15
Этанол 1 %	2,5 ± 0,18	1,6 ± 0,16
Этанол 5 %	2,8 ± 0,13*	2,2 ± 0,13*
Изопропанол 0,5 %	3,3 ± 0,15**	3,3 ± 0,15**
Изопропанол 2 %	3,6 ± 0,16***	3,5 ± 0,17***
Бутанол-1 0,25 %	3,7 ± 0,15***	3,7 ± 0,15***
Бутанол-1 1 %	3,9 ± 0,10***	3,7 ± 0,15***
Гексанол-1 0,25 %	3,7 ± 0,13***	3,8 ± 0,13***
Гексанол-1 1 %	3,9 ± 0,10***	3,9 ± 0,10***

Примечание. Данные представлены как среднее значение ± стандартная ошибка среднего (M ± SEM), $n = 10$. Статистическую значимость оценивали при сравнении с контрольной группой. * – $p < 0,05$; ** – $p < 0,01$; *** – $p < 0,001$; отсутствие звездочек – незначимо ($p \geq 0,05$).

На рис. 1 приведены микрофотографии гепатопанкреаса катушки роговой (*P. corneus* L.) контрольной и экспериментальных групп, на рис. 2 – прудовика обыкновенного (*L. stagnalis* L.) контрольной и экспериментальных групп.

Для контрольных групп характерно отсутствие морфологических изменений, что соответствует нормальному гистологическому строению гепатопанкреаса. Воздействие низших спиртов (метанол, этанол) вызывает слабовыраженные изменения структуры органа, тогда как при воздействии более липофильных спиртов (изопропанол, бутанол-1, гексанол-1) отмечается значительное увеличение степени морфологических нарушений у обоих видов.

При воздействии метанола и этанола наблюдаются слабовыраженные изменения, проявляющиеся незначительным расширением просветов ацинусов и появлением единичточных вакуолей в цитоплазме эпителиальных клеток. Общая архитектоника гепатопанкреаса при этом сохраняется. Межклеточные границы остаются различимыми (рис. 1, *b–d*; рис. 2, *b–d*).

Повышение концентрации этанола до 5 % сопровождается усилением структурных нарушений, которые проявляются более выраженной деформацией ацинусов и расширением их просветов. В отдельных участках отмечается разрыхление эпителиального слоя и появление клеточного детрита в просветах ацинусов (рис. 1, *e*; рис. 2, *e*).

Воздействие изопропанола приводит к более выраженным изменениям по сравнению с этанолом. При концентрации 0,5 % наблюдаются деформация ацинусов, а также расширение их просветов и умеренная вакуолизация эпителиальных клеток (рис. 1, *f*; рис. 2, *f*). При концентрации 2 % изменения приобретают выраженный характер и включают дезорганизацию ацинарной структуры, истончение эпителиального слоя и увеличение количества клеточного детрита (рис. 1, *g*; рис. 2, *g*).

Наиболее значительные морфологические изменения наблюдаются при воздействии бутанола-1 и гексанола-1. При концентрации 0,25 % прослеживается явная деформация ацинусов и неоднородность эпителиального слоя (рис. 1, *h*, *j*; рис. 2, *h*, *j*). При увеличении концентрации до 1 % развивается глубокая дезорганизация структуры гепатопанкреаса: фрагментация эпителия, значительное накопление клеточного детрита, вплоть до частичной утраты четкой ацинарной организации (рис. 1, *i*, *k*; рис. 2, *i*, *k*).

Алифатические спирты приводят к морфологическим изменениям гепатопанкреаса моллюсков, степень которых возрастает с ростом концентрации и липофильности спиртов. Основные изменения – это вакуолизация эпителиальных клеток, расширение просветов ацинусов и нарушение их структурной организации. Нарушение целостности эпителиального слоя и ацинарной организации, вероятно, приводит к снижению функциональной активности гепатопанкреаса, что должно отражаться на общем физиологическом состоянии организма.

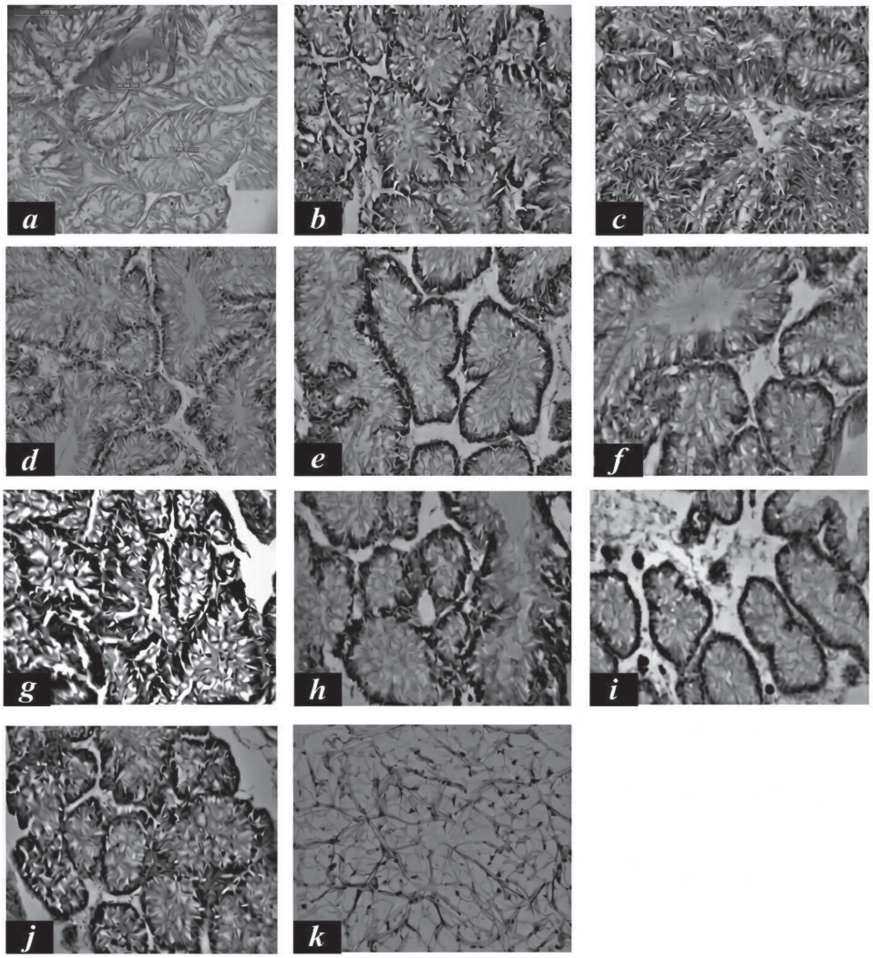


Рис. 1. Микрофотографии гепатопанкреаса *P. corneus* L.: *a* – контроль, *b* – метанол 0,25 %, *c* – метанол 1 %, *d* – этанол 1 %, *e* – этанол 5 %, *f* – изопропанол 0,5 %, *g* – изопропанол 2 %, *h* – бутанол-1 0,25 %, *i* – бутанол-1 1 %, *j* – гексанол-1 0,25 %, *k* – гексанол-1 1 %

Fig. 1. Microphotographs of the hepatopancreas of *P. corneus* L.: *a* – control, *b* – methanol 0.25 %, *c* – methanol 1 %, *d* – ethanol 1 %, *e* – ethanol 5 %, *f* – isopropanol 0.5 %, *g* – isopropanol 2 %, *h* – butanol-1 0.25 %, *i* – butanol-1 1 %, *j* – hexanol-1 0.25 %, *k* – hexanol-1 1 %

Результаты оценки поведенческих реакций представлены в табл. 2. Оценку проводили по полуколичественной шкале: «–» – отсутствие проявлений, «+» – слабая выраженность, «++» – умеренная выраженность, «+++» – высокая выраженность.

Выраженность изменений в поведении не полностью совпадает с уровнем морфологических повреждений. Возможно, включаются компенсаторные механизмы. На ранних этапах воздействия организм еще способен частично поддерживать функциональную активность, даже если структуры нарушены. Однако при усилении токсического действия этих механизмов уже не хватает.

В контрольной группе оба вида моллюсков демонстрируют выраженную ответную реакцию на механическое раздражение. После воздействия алифатических спиртов наблюдалось снижение реакции на раздражение. У прудовика обыкновенного уровень ответной реакции падал до умеренного или слабого. У катушки роговой при воздействии этанола в концентрации 1 %, изопропанола – 0,5 и 2 % и гексанола-1 – 0,25 % реакция на раздражение полностью отсутствовала. Снижение чувствительности, вероятно, связано с токсическим подавлением нервной системы.

У катушки роговой двигательная активность резко снижается под воздействием метанола в концентрациях 0,25 и 1 %, этанола – 5 %, бутанола-1 – 1 % и гексанола-1 – 1 %. Для прудовика обыкновенного снижение двигательной активности наблюдается почти во всех экспериментальных группах. Выделение слизи увеличивается при воздействии изопропанола, бутанола и гекса-

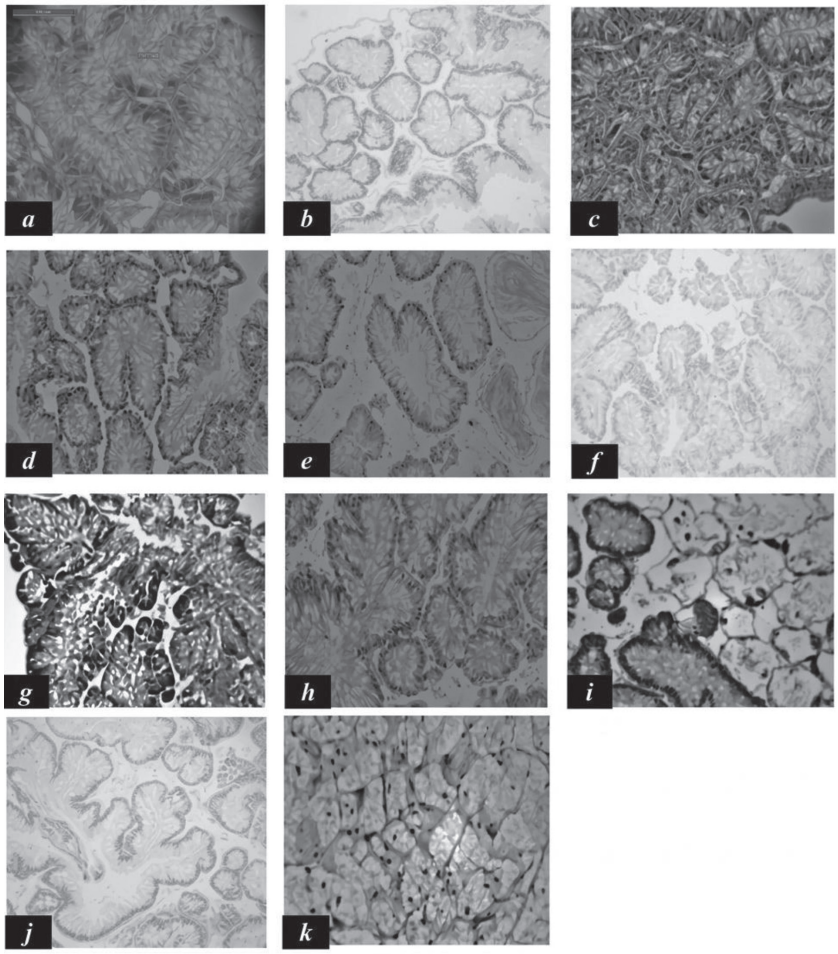


Рис. 2. Микрофотографии гепатопанкреаса *L. stagnalis* L.: *a* – контроль, *b* – метанол 0,25 %, *c* – метанол 1 %, *d* – этанол 1 %, *e* – этанол 5 %, *f* – изопропанол 0,5 %, *g* – изопропанол 2 %, *h* – бутанол-1 0,25 %, *i* – бутанол-1 1 %, *j* – гексанол-1 0,25 %, *k* – гексанол-1 1 %

Fig. 2. Microphotographs of the hepatopancreas of *L. stagnalis* L.: *a* – control, *b* – methanol 0.25 %, *c* – methanol 1 %, *d* – ethanol 1 %, *e* – ethanol 5 %, *f* – isopropanol 0.5 %, *g* – isopropanol 2 %, *h* – butanol-1 0.25 %, *i* – butanol-1 1 %, *j* – hexanol-1 0.25 %, *k* – hexanol-1 1 %

нола-1, вероятно, это проявление защитной реакции, усиливающейся с ростом длины углеродной цепи спирта.

Что касается репродуктивной активности, можно отметить, что у катушки роговой воздействие этанола в концентрациях 1 и 5 % приводит к откладыванию яиц (в контрольной группе кладок не было). У прудовика обыкновенного появление кладок наблюдается от воздействия метанола в концентрации 0,25 % и этанола – 1 и 5 %.

У прудовика обыкновенного поведенческие реакции угнетались сильнее, а двигательная активность сохранялась только при некоторых концентрациях спиртов. Это свидетельствует о меньшей устойчивости данного вида к воздействию алифатических спиртов и позволяет рассматривать прудовика обыкновенного как более чувствительный тест-объект в экотоксикологических исследованиях.

Сравнение с литературными данными показывает, что поведенческие реакции пресноводных моллюсков на алифатические спирты ранее систематически не изучались. Для других гидробионтов, например рыб, описано угнетение двигательной активности при высоких концентрациях метанола [20]. Стимуляция репродуктивной активности под воздействием этанола, выявленная в нашей работе, хорошо согласуется с данными E. C. Oliveira-Filho et al. [15]. В их исследовании наблюдается увеличение числа кладок *Biomphalaria tenagophila*, но в отличие от нашего исследования, в их работе такой эффект был достигнут при хроническом воздействии

Таблица 2. **Поведенческие реакции пресноводных моллюсков при воздействии алифатических спиртов**

Table 2. **Behavioral responses of freshwater mollusks to aliphatic alcohols**

Спирт, концентрация	Двигательная активность	Реакция на механическое раздражение	Слизеобразование	Репродуктивная активность
Катушка роговая				
Контроль	+++	+++	–	–
Метанол 0,25 %	–	++	–	–
Метанол 1 %	–	++	–	–
Этанол 1 %	+	–	–	++
Этанол 5 %	–	++	–	+
Изопропанол 0,5 %	++	–	+	–
Изопропанол 2 %	++	–	++	–
Бутанол-1 0,25 %	++	+	–	–
Бутанол-1 1 %	–	++	+	–
Гексанол-1 0,25 %	++	–	+	–
Гексанол-1 1 %	–	++	++	–
Прудовик обыкновенный				
Контроль	+++	+++	–	+
Метанол 0,25 %	–	+	–	+
Метанол 1 %	–	++	–	–
Этанол 1 %	–	+	–	++
Этанол 5 %	–	++	–	++
Изопропанол 0,5 %	–	++	+	–
Изопропанол 2 %	–	+	+	–
Бутанол-1 0,25 %	+	–	+	–
Бутанол-1 1 %	–	++	+	–
Гексанол-1 0,25 %	+	–	+	–
Гексанол-1 1 %	–	++	+	–

спирта. Усиление слизеобразования под воздействием изопропанола, бутанола-1 и гексанола-1 ранее не описывалось и может рассматриваться как видоспецифический защитный механизм.

Показатели нарушений в гепатопанкреасе и поведение животных связаны. Так, чем сильнее морфологические изменения органа, тем заметнее снижение двигательной активности, реакций на раздражение и репродуктивные функции организма (прямая зависимость). Поскольку гепатопанкреас отвечает и за пищеварение, и за детоксикацию, то при его повреждении накапливаются токсины и нарушается обмен веществ. Нервная система и мышцы страдают, а это приводит к наблюдаемым изменениям. При воздействии более токсичных веществ защитные механизмы различаются: катушка роговая начинает обильнее выделять слизь, а у прудовика обыкновенного, наоборот, наблюдается угнетение активности. Вероятно, так проявляется его способ адаптации (меньшая затрата энергии).

Заключение. Алифатические спирты вызывают морфологические изменения гепатопанкреаса лёгочных пресноводных моллюсков. Степень повреждений зависит от концентрации и вида асалифатических спиртов. При воздействии метанола и этанола наблюдается расширение просветов ацинусов и вакуолизация цитоплазмы. Воздействие изопропанола, бутанола-1 и гексанола-1 приводит к выраженным структурным изменениям: дезорганизации ацинарной структуры, фрагментации эпителия и накоплению клеточного детрита. Поведенческие реакции связаны с морфологией. Катушка роговая проявляет более высокую устойчивость и активнее вырабатывает слизь (защитный механизм), в то время как у прудовика обыкновенного наблюдается выраженное угнетение двигательной активности. Откладка яиц тоже может быть рассмотрена как стресс-индуцированная реакция.

Полученные результаты подтверждают высокую чувствительность гепатопанкреаса моллюсков к воздействию алифатических спиртов и обосновывают использование морфологических изменений гепатопанкреаса в качестве биомаркера для экотоксикологического мониторинга водных экосистем.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Работа выполнена в рамках НИР по теме «Обоснование использования биомаркеров алкогольдегидрогеназы для оценки загрязнения поверхностных вод Белорусского Поозерья алифатическими спиртами» (№ ГР 20251474 от 20.10.2025).

Acknowledgements. The work was carried out as part of a scientific research project on the topic "Justification of the use of alcohol dehydrogenase biomarkers to assess the pollution of surface waters of the Belarusian Poozerie with aliphatic alcohols" (state registration number 20251474 dated 20 October 2025).

Список использованных источников

1. Сидоров, А. В. Нейромодуляторное действие пероксида водорода на центральные нейроны пищевой сети моллюска *Lymnnaea stagnalis* // Журнал эволюционной биохимии и физиологии. – 2017. – Т. 53, № 6. – С. 437–443

2. Сидоров, А. В. Модельные организмы и клеточная организация нервных центров // Наука и инновации. – 2018. – Т. 6, № 6. – С. 10–14.

3. Голубев, А. П. Динамика процессов радиоадаптации в популяциях моллюсков из водоемов Белорусского сектора зоны загрязнения ЧАЭС / А. П. Голубев // Экологический вестник. – 2012. – № 2. – С. 44–57.

4. Оценка совместного влияния температурного стресса, загрязнения и паразитарной инвазии на активность ферментов антиоксидантной системы у легочного моллюска *Lymnaea stagnalis* / А. С. Хомич, Д. В. Аксёнов-Грибанов, О. А. Бодиловская [и др.] // Сибирский экологический журнал. – 2017. – Т. 24, № 2. – С. 184–192.

5. Дромашко, С. Е. Влияние тяжелых металлов на большого прудовика *Lymnaea stagnalis* L. / С. Е. Дромашко, С. Н. Шевцова, А. С. Бабенко. – Мн.: Бел. навука, 2018. – 172 с.

6. Чиркин, А. А. Молекулярно-структурная гомология протеолитических ферментов / А. А. Чиркин, О. М. Балаева-Тихомирова. – Чебоксары: Изд. дом «Среда», 2022. – 124 с.

7. Rőszer, T. The invertebrate midintestinal gland ("hepatopancreas") is an evolutionary forerunner in the integration of immunity and metabolism / T. Rőszer // Cell and Tissue Research. – 2014. – Vol. 358, N 3. – P. 685–695. https://doi.org/10.1007/s00441-014-1985-7

8. Biomarkers of oxidative stress in freshwater bivalve mollusks (review) / Y. S. Klimova, G. M. Chuiko, D. S. Pesnya, E. S. Ivanova // Inland Water Biology. – 2020. – Vol. 13, N 4. – P. 674–683. https://doi.org/10.1134/S1995082920060073

9. Efficient treatment of alcohol wastewater and its potential pollutant control strategies / H. Wu, R. Yan, A. Li [et al.] // Journal of Water Process Engineering. – 2024. – Vol. 58. – Art. 104882. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.104882

10. Салихянова, С. А. Очистка сточных вод на предприятии спиртовой промышленности / С. А. Салихянова // Вестник магистратуры. – 2019. – № 3–2. – С. 51–52.

11. Lushchak, V. I. Environmentally induced oxidative stress in aquatic animals / V. I. Lushchak // Aquatic Toxicology. – 2011. – Vol. 101, N 1. – P. 13–30. https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2010.10.006

12. Pathological and ultrastructural changes of *Bellamya bengalensis* under chronic carboxylic acid exposure at environmentally relevant levels: inferences from GUTS predictions and hepatopancreatic integrity assessment / P. Sharma, A. Chukwuka, S. Chatterjee [et al.] // Chemosphere. – 2024. – Vol. 361. – Art. 142542. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142542

13. The toxic and metabolic effects of 23 aliphatic alcohols in the isolated perfused rat liver / O. Strubelt, M. Deters, R. Pentz [et al.] // Toxicological Sciences. – 1999. – Vol. 49, N 1. – P. 133–142. https://doi.org/10.1093/toxsci/49.1.133

14. Ingólfsson, H. I. Alcohol's effects on lipid bilayer properties / H. I. Ingólfsson, O. S. Andersen // Biophysical Journal. – 2011. – Vol. 101, N 4. – P. 847–855. https://doi.org/10.1016/j.bpj.2011.07.013

15. Oliveira-Filho, E. C. Effects of endosulfan and ethanol on the reproduction of the snail *Biomphalaria tenagophila*: a multigeneration study / E. C. Oliveira-Filho, C. K. Grisolia, F. J. Paumgartten // Chemosphere. – 2009. – Vol. 75, N 3. – P. 398–404. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.11.085

16. Wu, D. Alcohol, oxidative stress, and free radical damage / D. Wu, A. I. Cederbaum // Alcohol Research and Health. – 2003. – Vol. 27, N 4. – P. 277–284.

17. Reactive oxygen species as key molecules in the pathogenesis of alcoholic fatty liver disease and nonalcoholic fatty liver disease: future perspectives / Z. Zhang, H. Yang, F. Han, P. Guo // Current Issues in Molecular Biology. – 2025. – Vol. 47, N 6. – Art. 464. https://doi.org/10.3390/cimb47060464

18. Kaviraj, A. Toxicity of methanol to fish, crustacean, oligochaete worm, and aquatic ecosystem / A. Kaviraj, F. Bhunia, N. C. Saha // International Journal of Toxicology. – 2004. – Vol. 23, N 1. – P. 55–63. https://doi.org/10.1080/10915810490265469

19. Dymond, M. K. A membrane biophysics perspective on the mechanism of alcohol toxicity / M. K. Dymond // Chemical Research in Toxicology. – 2023. – Vol. 36, N 6. – P. 793–804. https://doi.org/10.1021/acs.chemrestox.3c00039

20. Toxicity and Sublethal Effects of Methanol on Swimming Performance of Juvenile Florida Pompano / D. M. Baltz, E. J. Chesney, M. A. Tarr [et al.] // Transactions of the American Fisheries Society. – 2005. – Vol. 134, N 3. – P. 730–740. https://doi.org/10.1577/T04-136.1

References

1. Sidorov A. V. Neuromodulatory effects of hydrogen peroxide on central neurons in the feeding network of the mollusk *Lymnaea stagnalis*. *Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology*, 2017, vol. 53, no. 6, pp. 493–500. https://doi.org/10.1134/S0022093017060060

2. Sidorov A. V. Model'nye organizmy i kletochnaya organizatsiya nervnykh tsentrov. *Nauka i innovatsii* [Science and Innovations], 2018, no. 6, pp. 10–14 (in Russian).

3. Golubev A. P. The dynamics of radioadaptation processes in mollusk populations in water bodies within the Belarusian sector of Chernobyl nuclear contamination zone. *Ekologicheskii vestnik* [Ecological Bulletin], 2012, no. 2, pp. 44–57 (in Russian).

4. Khomich A. S., Axenov-Gribanov D. V., Bodilovskaya O. A., Shirokova Y. A., Shchapova E. P., Lubyaga Y. A., Shatilina Z. M., Emshanova V. A., Golubev A. P. Assessment of the joint effect of thermal stress, pollution, and parasitic infestation on the activity of antioxidative enzymes in pulmonate mollusk *Lymnaea stagnalis*. *Contemporary Problems of Ecology*, 2017, vol. 10, no. 2, pp. 157–163. https://doi.org/10.1134/S1995425517020068

5. Dromashko S. E., Shevtsova S. N., Babenko A. S. *Influence of heavy metals on the large pond snail Lymnaea stagnalis L.* Minsk, Belaruskaya Navuka Publ., 2018. 172 p. (in Russian).

6. Chirkin A. A., Balaeva-Tikhomirova O. M. *Molekulyarno-strukturnaya gomologiya proteoliticheskikh fermentov: monografiya*. Cheboksary, Publishing house "Sreda", 2022. 124 p. (in Russian).

7. Rőszer T. The invertebrate midintestinal gland ("hepatopancreas") is an evolutionary forerunner in the integration of immunity and metabolism. *Cell and Tissue Research*, 2014, vol. 358, no. 3, pp. 685–695. https://doi.org/10.1007/s00441-014-1985-7

8. Klimova Y. S., Chuiko G. M., Pesnya D. S., Ivanova E. S. Biomarkers of oxidative stress in freshwater bivalve mollusks (review). *Inland Water Biology*, 2020, vol. 13, no. 4, pp. 674–683. https://doi.org/10.1134/S1995082920060073

9. Wu H., Yan R., Li A., Huang D., Pan J., Zhao P., Xing Z. Efficient treatment of alcohol wastewater and its potential pollutant control strategies. *Journal of Water Process Engineering*, 2024, vol. 58, art. 104882. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.104882

10. Salikhyanova S. A. Ochistka stochnykh vod na predpriyatii spirtovoy promyshlennosti. *Vestnik magistratury* [Bulletin of the Magistracy], 2019, no. 3–2, pp. 51–52 (in Russian).

11. Lushchak V. I. Environmentally induced oxidative stress in aquatic animals. *Aquatic Toxicology*, 2011, vol. 101, no. 1, pp. 13–30. https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2010.10.006

12. Sharma P., Chukwuka A., Chatterjee S., Chakraborty D., Saha N. C. Pathological and ultrastructural changes of *Bellamya bengalensis* under chronic carboxylic acid exposure at environmentally relevant levels: inferences from GUTS predictions and hepatopancreatic integrity assessment. *Chemosphere*, 2024, vol. 361, art. 142542. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142542

13. Strubelt O., Deters M., Pentz R., Siegers C. P., Younes M. The toxic and metabolic effects of 23 aliphatic alcohols in the isolated perfused rat liver. *Toxicological Sciences*, 1999, vol. 49, no. 1, pp. 133–142. https://doi.org/10.1093/toxsci/49.1.133

14. Ingólfsson H. I., Andersen O. S. Alcohol's effects on lipid bilayer properties. *Biophysical Journal*, 2011, vol. 101, no. 4, pp. 847–855. https://doi.org/10.1016/j.bpj.2011.07.013

15, Oliveira-Filho E. C., Grisolia C. K., Paumgartten F. J. Effects of endosulfan and ethanol on the reproduction of the snail *Biomphalaria tenagophila*: a multigeneration study. *Chemosphere*, 2009, vol. 75, no. 3, pp. 398–404. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.11.085

16. Wu D., Cederbaum A. I. Alcohol, oxidative stress, and free radical damage. *Alcohol Research and Health*, 2003, vol. 27, no. 4, pp. 277–284.

17. Zhang Z., Yang H., Han F., Guo P. Reactive oxygen species as key molecules in the pathogenesis of alcoholic fatty liver disease and nonalcoholic fatty liver disease: future perspectives. *Current Issues in Molecular Biology*, 2025, vol. 47, no. 6, art. 464. https://doi.org/10.3390/cimb47060464

18. Kaviraj A., Bhunia F., Saha N. C. Toxicity of methanol to fish, crustacean, oligochaete worm, and aquatic ecosystem. *International Journal of Toxicology*, 2004, vol. 23, no. 1, pp. 55–63. https://doi.org/10.1080/10915810490265469

19. Dymond M. K. A membrane biophysics perspective on the mechanism of alcohol toxicity. *Chemical Research in Toxicology*, 2023, vol. 36, no. 6, pp. 793–804. https://doi.org/10.1021/acs.chemrestox.3c00039

20. Baltz D. M., Chesney E. J., Tarr M. A., Kolok A. S., Bradley M. J. Toxicity and Sublethal Effects of Methanol on Swimming Performance of Juvenile Florida Pompano. *Transactions of the American Fisheries Society*, 2005, vol. 134, no. 3, pp. 730–740. https://doi.org/10.1577/T04-136.1

Информация об авторах

Вишневская Мария Викторовна – аспирант. Витебский государственный университет им. П. М. Машерова (Московский пр-т, 33, 210038, г. Витебск, Республика Беларусь). E-mail: vishnewskaya.mascha@yandex.ru.

Пинчук Полина Юрьевна – аспирант. Витебский государственный университет им. П. М. Машерова (Московский пр-т, 33, 210038, г. Витебск, Республика Беларусь). E-mail: polina_mileeva@mail.ru. https://orcid.org/0009-0006-1489-3016

Чиркин Александр Александрович – д-р биол. наук, профессор, профессор кафедры. Витебский государственный университет им. П. М. Машерова (Московский пр-т, 33, 210038, г. Витебск, Республика Беларусь). E-mail: alexchir43@gmail.com. https://orcid.org/0000-0003-4345-4136

Information about the authors

Maria V. Vishnevskaya – Postgraduate Student. Vitebsk State University named after P. M. Masherov (33, Moskovskiy Ave., 210038, Vitebsk, Republic of Belarus). E-mail: vishnewskaya.mascha@yandex.ru

Polina Yu. Pinchuk – Postgraduate Student. Vitebsk State University named after P. M. Masherov (33, Moskovskiy Ave., 210038, Vitebsk, Republic of Belarus). E-mail: polina_mileeva@mail.ru. https://orcid.org/0009-0006-1489-3016

Alexander A. Chirkin – D. Sc. (Biol.), Professor, Professor of the Department. Vitebsk State University named after P. M. Masherov (33, Moskovskiy Ave., 210038, Vitebsk, Republic of Belarus). E-mail: alexchir43@gmail.com. https://orcid.org/0000-0003-4345-4136