

ВЕСЦІ

НАЦЫЯНАЛЬнай

АКАДЭМІі НАВУК БЕЛАРУСІ

СЕРЫЯ БІЯЛАГІЧНЫХ НАВУК. 2023. Т. 68, № 4

ИЗВЕСТИЯ

НАЦИОНАЛЬНОЙ

АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ

СЕРИЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ НАУК. 2023. Т. 68, № 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

- М. Е. Никифоров** (*заместитель главного редактора*) – Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по биоресурсам, Минск, Республика Беларусь
- В. И. Парфенов** (*заместитель главного редактора*) – Институт экспериментальной ботаники имени В. Ф. Купревича Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь
- В. Г. Колосовская** – *ведущий редактор журнала*
- И. Д. Вологовский** – 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

А. Н. Евтушенко – Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь
А. В. Кильчевский – Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь
Э. И. Коломиец – Институт микробиологии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь
Н. А. Лапан – Институт экспериментальной ботаники имени В.Ф. Купревича Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь
А. Г. Лобанок – Институт микробиологии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь
В. Е. Падутов – Институт леса Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Республика Беларусь
В. Н. Решетников – Центральный ботанический сад Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь
В. В. Титок – Центральный ботанический сад Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь
В. И. Торчик – Центральный ботанический сад Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь
Л. В. Хотылева – Институт генетики и цитологии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь
В. М. Шкуматов – Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

Редакционный совет

В. Ф. Багинский – Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, Гомель, Республика Беларусь
А. Баршевский – Даугавпилский университет, Даугавпилс, Латвийская Республика
Я. Б. Блюм – Институт пищевой биотехнологии и геномики Национальной академии наук Украины, Киев, Украина
В. Е. Гайдук – Брестский государственный университет им. А. С. Пушкина, Брест, Республика Беларусь
Ю. Ю. Дгебуадзе – Институт проблем экологии и эволюции им. 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 им. К. А. Тимирязева Российской академии наук, Москва, Российская Федерация
В. Олех-Пяэцка – Варшавский университет естественных наук, Варшава, Республика Польша
О. Н. Пугачев – Зоологический институт Российской академии наук, Санкт-Петербург, Российская Федерация
А. И. Рапопорт – Институт микробиологии и биотехнологии Латвийского университета, Рига, Латвийская Республика
И. А. Тихонович – Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной микробиологии, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Адрес редакции:

ул. Академическая, 1, к. 119, 220072, г. Минск, Республика Беларусь.

Тел.: + 375 17 272-19-19; e-mail: biolvesti@mail.ru

Сайт: vestibio.belnauka.by

ИЗВЕСТИЯ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ.

Серия биологических наук. 2023. Т. 68, № 4.

Выходит на русском, белорусском и английском языках

Редактор *В. Г. Колосовская*

Компьютерная верстка *Н. И. Кашуба*

Подписано в печать 06.10.2023. Выход в свет 25.10.2023. Формат 60×84¹/₈. Бумага офсетная.

Печать цифровая. Усл. печ. л. 10,23. Уч.-изд. л. 11,3. Тираж 74 экз. Заказ 223.

Цена номера: индивидуальная подписка – 12,80 руб., ведомственная подписка – 29,91 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, 2023

PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS

BIOLOGICAL SERIES. 2023, vol. 68, 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)*

Editor-in-Chief

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

Editorial Board

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

Viktor I. Parfyonov (*Associate Editor-in-Chief*) – V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the
National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Valentina G. Kolosovskaya – *Managing Editor*

Anatoli N. Evtushenkov – Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

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

Lyubov V. Khotyleva – Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Republic of Belarus

Alexander V. Kilchevsky – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic
of Belarus

Emiliya I. Kolomiets – Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus, 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

Anatoli G. Lobanok – Institute of Microbiology 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
Vladimir N. Reshetnikov – Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus
Vladimir M. Shkumatov – Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus
Vladimir V. Titok – Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus
Vladimir I. Torchuk – Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus
Igor D. Volotovskii – Institute of Biophysics and Cell Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

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

Vladimir F. Baginski – F. Skorina Gomel State University, Gomel, Republic of Belarus
Arvids Barsevskis – Daugavpils University, Daugavpils, Republic of Lithuania
Yaroslav B. Blume – Institute of Food Biotechnology and Genomics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine
Yuri Yu. Dgebuadze – A. N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
Vasily E. Gayduk – A. S. Pushkin Brest State University, Brest, Republic of Belarus
Nikolay A. Kolchanov – Institute of Cytology and Genetics of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation
Vladimir V. Kuznetsov – K. A. Timiriazev Institute of Plant Physiology of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
Wanda Olech-Piasecka – Warsaw University of Life Sciences, Warsaw, Republic of Poland
Oleg N. Pugachev – Zoological Institute of the Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg, Russian Federation
Alexander I. Rapoport – Institute of Microbiology and Biotechnology of University of Latvia, Riga, Latvian Republic
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, 2023, vol. 68, no. 4.

Printed in Russian, Belarusian and English languages

Editor *V. G. Kolosovskaya*
Computer imposition *N. I. Kashuba*

Sent for press 06.10.2023. Output 25.10.2023. Format 60×84¹/₈. Offset paper.
Digital press. Printed sheets 10.23. Publisher's signatures 11.3. Circulation 74 copies. Order 223.
Number price: individual subscription – 12.80 byn., departmental subscription – 29.91 byn.

Publisher and printing execution:

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

© RUE "Publishing House "Belaruskaya Navuka",
Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological series, 2023

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

ЗМЕСТ

Гетко Н. В., Кабушева И. Н., Сак Н. Л., Титок В. В. Влияние спектрального состава света на морфогенез сеянцев <i>Myrtus communis</i> L. и <i>Psidium cattleianum</i> Sabine (<i>Myrtaceae</i> Juss.) в малообъемной оранжерейной культуре.....	271
Молчан О. В., Обуховская Л. В., Куделина Т. Н., Астасенко Н. И., Баркун М. И., Трофимов Ю. В. Активация LED-освещением фотосинтетических и ростовых процессов растений томата в условиях опытно-производственного участка	282
Мороз М. Д., Вежновец В. В. Макрозообентос реки Неман в границах Гродненской области	293
Латышев С. Э., Мержвинский Л. М., Высоцкий Ю. И., Латышева В. В. Растительность порядка <i>Magnocaricetalia</i> в озерах Белорусского Поозерья	303
Капустина Ю. М., Рубаник Л. В., Шмелева Н. П., Сивец Н. В., Григорьева Е. Е. ПЦР в режиме реального времени для индикации представителей порядка Chlamydiales: необходимость разработки и основные аналитические характеристики метода.....	315
Кондратов Е. В., Торчик В. И. Влияние способов прививки на приживаемость и морфометрические параметры привитых растений рода <i>Pinus</i> L.	325
Курнушко А. С., Скурагович Т. А., Бекиш Ю. Н., Азизбекян С. Г., Молчан О. В. Влияние солей и наночастиц селена и кремния на рост мицелия <i>Fusarium avenaceum</i> (Fr.) Sacc. и <i>Bipolaris sorokiniana</i> (Sacc.) Shoem. и прорастание семян злаковых культур.....	332
Лапука И. И. Трофическая структура зообентоса водоема-охладителя Лукомльской ГРЭС.....	345

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

CONTENTS

Hetko N. V., Kabusheva I. N., Sak N. L., Titok V. V. Influence of the spectral composition of light on the morphogenesis of seedlings of <i>Myrtus communis</i> L. and <i>Psidium cattleianum</i> Sabine (<i>Myrtaceae</i> Juss.) in a small pot greenhouse culture	271
Molchan O. V., Obukhovskaya L. V., Kudelina T. N., Astasenko N. I., Barkun M. I., Trofimov Yu. V. Activation of growth and photosynthetic processes of tomato plants by LED lighting under production conditions	282
Moroz M. D., Vezhnovets V. V. Macrozoobenthos of the Neman River within the borders of the Grodno region	293
Latyshau S. E., Merzhvinski L. M., Vysotski Yu. I., Latyshava U. V. Vegetation of <i>Magnocaricetalia</i> union in the lakes of the Belarusian Lakeland	303
Kapustina Yu. M., Rubanik L. V., Shmeleva N. P., Sivets N. V., Grigorieva E. E. Real-time PCR for indication of representatives of Chlamydiales order: needs for development and main analytical characteristics of the method.....	315
Kandratau Y. V., Torchyk U. I. Influence of grafting methods on the survival and morphometric parameters of grafted plants the genus <i>Pinus</i> L.	325
Kurnushko A. S., Skuratovich T. A., Bekish Y. N., Azizbekyan S. G., Molchan O. V. Influence of selenium and silicon salts and nanoparticles on the growth of <i>Fusarium avenaceum</i> (Fr.) Sacc. and <i>Bipolaris sorokiniana</i> (Sacc.) Shoem. mycelium and grain seeds germination.....	332
Lapuka I. I. Trophic structure of the zoobenthos in the water-cooling pool of Lukomlskaya GRES.....	345

ISSN 1029-8940 (Print)

ISSN 2524-230X (Online)

УДК 635.918.582.774:581.14.043

<https://doi.org/10.29235/1029-8940-2023-68-4-271-281>

Поступила в редакцию 13.04.2023

Received 13.04.2023

Н. В. Гетко, И. Н. Кабушева, Н. Л. Сак, В. В. Титок*Центральный ботанический сад НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь***ВЛИЯНИЕ СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА СВЕТА НА МОРФОГЕНЕЗ СЕЯНЦЕВ
MYRTUS COMMUNIS L. И *PSIDIUM CATTLEIANUM* SABINE (MYRTACEAE JUSS.)
В МАЛООБЪЕМНОЙ ОРАНЖЕРЕЙНОЙ КУЛЬТУРЕ**

Аннотация. Изучено влияние интенсивности и спектрального состава света светодиодного (LED) и люминесцентных (FL) излучателей на морфогенез сеянцев *Myrtus communis* L. и *Psidium cattleianum* Sabine (*Myrtaceae*) в малообъемной оранжерейной культуре в Центральном ботаническом саду НАН Беларуси. Показано, что по высоте растений, числу и общей поверхности листьев, а также по удельной сухой массе листа сеянцы обоих видов за 120 дней выращивания во всех вариантах с облучением превосходили контрольные растения. На прирост сухой массы на 1 см² листа (по отношению к контролю), характеризующий продуктивность фотосинтеза, оказал влияние спектральный состав излучения, позволивший выявить межвидовые и межвариантные различия. В варианте с лампой FL Narva с плотностью общего фотонного потока PFD = 76,22 мкмоль/м²/с, с долей зеленого спектра PFD-G = 46,47 %, красного – PFD-R = 20,00 % и с величиной соотношения R/FR = 5,77 у субтропического вида длинного дня *M. communis* он составил 1,24 мг, а у тропического вида короткого дня *P. cattleianum* – всего 0,39 мг. У обоих видов, облученных LED-лампой с PFD = 186,20 мкмоль/м²/с, PFD-R = 59,34 % и при R/FR = 54,43, величина прироста составила 2,60 и 1,93 мг соответственно по отношению к контролю. Светодиодные источники являются более эффективными в отношении продуктивности фотосинтеза для растений короткого и длинного дня.

Ключевые слова: LED-, FL-источники излучения; сеянцы *Myrtus communis*, *Psidium cattleianum*; спектральный состав излучения; морфогенез; растения короткого дня; растения длинного дня

Для цитирования: Влияние спектрального состава света на морфогенез сеянцев *Myrtus communis* L. и *Psidium cattleianum* Sabine (*Myrtaceae* Juss.) в малообъемной оранжерейной культуре / Н. В. Гетко [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. біял. навук. – 2023. – Т. 68, № 4. – С. 271–281. <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2023-68-4-271-281>

Nelly V. Hetko, Irina N. Kabusheva, Nataliya L. Sak, Vladimir V. Titok*Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus***INFLUENCE OF THE SPECTRAL COMPOSITION OF LIGHT ON THE MORPHOGENESIS
OF SEEDLINGS OF *MYRTUS COMMUNIS* L. AND *PSIDIUM CATTLEIANUM* SABINE (MYRTACEAE JUSS.)
IN A SMALL POT GREENHOUSE CULTURE**

Abstract. The influence of the intensity and spectral composition of LED and fluorescent (FL) light on the morphogenesis of *Myrtus communis* L. and *Psidium cattleianum* Sabine (*Myrtaceae*) seedlings in a small pot greenhouse culture in the Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus (CBG) was studied. It was shown that in terms of plant height, the number and total surface of leaves, as well as the specific dry weight of the leaf, seedlings of both species over 120 cultivation days in all variants with irradiation surpassed control plants. The increase in dry weight per 1 cm² of leaf (mg with respect to the control) that characterizes the photosynthesis productivity was influenced by the spectral composition of radiation, which made it possible to identify interspecies and intervariant differences. The variant with an FL Narva lamp with a total photon flux density PFD = 76.22 μmol/m²/s, with a share of the green spectrum PFD-G = 46.47 %, red – PFD-R = 20.00 % and with the value of the ratio R/FR = 5.77 in the subtropical long-day species *M. communis*, it was 1.24 mg, while in the tropical short-day species *P. cattleianum* had only 0.39 mg. In plants irradiated with an LED lamp with a photon flux density PFD = 186.20 μmol/m²/s, with a share of PFD-R = 59.34 %, and at R/FR = 54.43, the growth was 2.60 and 1.93 mg with respect to control, respectively. LED sources are the most efficient in terms of the photosynthesis productivity for both short-day and long day plants.

Keywords: LED-, FL-sources of radiation; seedlings of *Myrtus communis*, *Psidium cattleianum*; spectral composition of radiation; morphogenesis; short-day plants; long-day plants

For citation: Hetko N. V., Kabusheva I. N., Sak N. L., Titok V. V. Influence of the spectral composition of light on the morphogenesis of seedlings of *Myrtus communis* L. and *Psidium cattleianum* Sabine (*Myrtaceae* Juss.) in a small pot greenhouse culture. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya biyalagichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological series*, 2023, vol. 68, no. 4, pp. 271–281 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2023-68-4-271-281>

Введение. К семейству Миртовые (*Myrtaceae* Juss.), в котором, по информации базы данных World Flora Online [1], насчитывается 6233 вида в составе 129 родов, относятся такие широко известные растения мировой флоры, как мирт, гвоздичное дерево, гуава, фейхоа, чайное дерево, эвкалипт и многие другие. Обитают они главным образом в тропических странах, но особенно распространены в Австралии и тропической Америке. Широкой известностью пользуется мирт обыкновенный (*Myrtus communis* L.), по имени которого названы семейство и подсемейство – Миртовые (*Myrtoideae* Sweet.). Большинство видов этого семейства представляют значительный интерес для практического использования в качестве источников биологически активных веществ. Все они являются декоративно-лиственными красивоцветущими плодовыми деревьями или кустарниками, богатыми фитонцидами и эфирными маслами, многие из них лекарственные.

В коллекционном фонде оранжерейных растений Центрального ботанического сада (ЦБС) семейство Миртовые (*Myrtaceae* Juss.) представлено 17 наименованиями, принадлежащими к 10 родам, которые включают 13 видов, 3 сорта и 1 подвид. Среди них 8 видов достигают репродуктивной стадии развития, а 6 образуют плоды и всхожие семена [2], что позволяет получать посадочный материал местной репродукции для расширенного использования в практике озеленения и комнатном цветоводстве.

Для сохранения вечнозеленых видов растений в контролируемых условиях оранжерей важно оптимально приблизить ритмы их развития к условиям естественного обитания, особенно в плане регулирования таких важнейших факторов, какими являются свет и долгота дня. Свет как источник энергии является одной из наиболее важных переменных, влияющих на фотосинтез, рост и развитие растений, а также ключевым фактором их приспособляемости к условиям окружающей среды [3].

В теплицах и других контролируемых средах, в которых интенсивность естественного излучения, как правило, низка, выращивание растений зависит от дополнительного освещения для оптимизации фотосинтеза, повышения уровня продукции и обеспечения круглогодичного производства. Долгое время исследования, связанные с источниками искусственного освещения, были сосредоточены на оптимизации эффективности их использования для фотосинтеза [4].

Вопрос о качестве света в растениеводстве стал решаться сравнительно недавно, с развитием передовой светодиодной технологии, которая не только энергоэффективна, но и позволяет контролировать спектральный состав света. Известно, что различные области спектра ответственны за определенные процессы морфогенеза: синий свет, как его основной компонент, стимулирует формирование листьев, закладку вегетативных почек; красный свет активизирует закладку цветочных почек [5]. Диапазон длин волн от 430 до 500 нм эффективен для имитации пигментации, метаболизма вторичных метаболитов, фотосинтетической функции и развития хлоропластов [6, 7]. Исследования в диапазоне длин волн 500–600 нм выявили его важное физиологическое и морфологическое влияние на рост, содержание хлорофилла и фотосинтетическую функцию [8]. Диапазон длин волн красного спектра 640–670 нм эффективен для стимулирования фотосинтетической активности, увеличения биомассы растений и площади листа, и при этом он играет критически важную роль в развитии фотосинтетического аппарата, чистой скорости фотосинтеза и в первичном метаболизме [9].

Красный и дальний красный свет поглощается пигментом фитохромом, который запускает ряд морфологических процессов и процессов развития, влияющих на продуктивность растений. Этот пигмент существует в двух взаимно превращающихся фотохимических формах: P_R -форма, аккумулирующая красный свет в диапазоне 650–680 нм с пиком поглощения при 666 нм, превращается в P_{FR} -форму, которая, в свою очередь, поглощая дальний красный свет в диапазоне 710–740 нм с пиком поглощения 730 нм, преобразуется в P_R -форму [10].

Долгое время считалось, что из-за плохого поглощения листьями дальнего красного света ($\lambda > 700$ нм) и низкого квантового выхода фотосинтеза он не вносит никакого вклада в фотосинтез или вносит минимальный вклад [11]. В настоящее время известно, что низкий квантовый выход фотосинтеза в дальнем красном свете обусловлен неуравновешенным возбуждением фотосистем PSI и PSII, последовательно работающих для осуществления фотохимических реакций. Если свет с более короткой длиной волны дополнить дальним красным светом, который преиму-

щественно возбуждает PSI, возможно восстановление баланса возбуждения между двумя фотосистемами, что позволит увеличить скорость фотохимических реакций и квантовый выход фотосинтеза [12].

Таким образом, чтобы эффективно использовать все преимущества искусственных источников света и разрабатывать световые матрицы для конкретных растений, важно понимать, как качество света влияет на рост и развитие растений. Спектральный состав света, долгота дня и фотопериод выступают в качестве основных светотехнических параметров.

Цель данного исследования – оценка влияния спектральных характеристик искусственных источников света на морфогенез двух представителей семейства *Myrtaceae* Juss. (*Myrtus communis* L., *Psidium cattleianum* Sabine) для получения качественного посадочного материала собственной репродукции в малообъемной оранжерейной культуре.

Объекты и методы исследования. В качестве объектов исследования привлечены два вида данного семейства: *Myrtus communis* L. и *Psidium cattleianum* Sabine, представляющих, соответственно, флоры разных географических континентов: Южную Европу и тропическую Америку. Сохраняемые в коллекциях ЦБС, они проходят полный цикл развития в условиях оранжерейной культуры.

Myrtus communis L. – мирт обыкновенный, вечнозеленый кустарник или дерево до 3 м высотой, естественно произрастает в сухих субтропиках Средиземноморья в подлеске вечнозеленых дубов и сосен, в зарослях вечнозеленых кустарников (маквис). Высокодекоративный вид с темно-зелеными листьями почти без черешков. Характеризуется средней скоростью роста. Цветки пятилепестковые, белого цвета с кремовым оттенком, около 2 см в диаметре. Плод – ягода темно-синего цвета. Рекомендуются для зимних садов, интерьеров, большой популярностью пользуется в качестве комнатного растения.

Psidium cattleianum Sabine – псидиум Кеттли, гуава Кеттли, земляничная гуава. Родина – Восточная Бразилия. К мирту, особенно к его вест-индским видам, наиболее близок большой род псидиум (*Psidium* L.), насчитывающий около 100 видов в Вест-Индии и тропической Южной Америке. *P. cattleianum* популярен как плодовая культура. Встречается в тенистых густых лесах и по долинам рек. Вечнозеленое, медленно растущее дерево высотой 2–4 м, с темно-зелеными глянцевыми кожистыми листьями 4–12 см длиной и 2–6 см шириной. Плод круглый, 2,5–4,0 см в диаметре, с тонкой кожицей пурпурно-красного цвета. Плоды съедобны, мякоть сочная, с земляничным ароматом. Широко культивируется в тропиках: в Южной Калифорнии, на Антильских, Багамских, Сейшельских и Бермудских островах, в Африке, Индии, Малайзии, на Шри-Ланке, Филиппинах.

Растения тропической флоры произрастают в условиях короткого, максимум 12-часового, светового дня, а растения субтропиков – это растения длинного светового дня (long day plants – LDP), 14–16-часового фотопериода. При выращивании в условиях оранжерей умеренного климата важно учитывать особенности светового режима, к которому они адаптированы в местах их естественного произрастания. Поэтому подходы к разработке световых технологий для этих групп растений в условиях оранжерей могут различаться. В данном случае оба привлеченные для исследований вида – это растения, естественно произрастающие под пологом тропического (*P. cattleianum*) или субтропического (*M. communis*) лесного массива, адаптированные к условиям затенения.

В качестве экспериментального материала использованы двухмесячные сеянцы собственной репродукции обоих видов, распикированные в горшки объемом 0,3 л с почвенной смесью, состоящей из верхового торфа, дерновой земли, агроперлита и песка в соотношении 1 : 1 : 0,5 : 0,1. В каждом варианте опыта по 15 растений *M. communis* и *P. cattleianum*.

Опытные растения были размещены в световых шкафах со специально созданными тремя вариантами искусственного освещения: 1 – полноспектральный светодиодный светильник для растений LED – фитолампа ULI-P11-35W/SPFR (LED Uniel) с кремовым свечением, фотосинтетический фотонный поток 49 мкмоль/с, цветовая температура 4000 (холодный белый свет); 2 – люминесцентная лампа NARVA LT 30WT/760-010 (FL Narva), световой поток 1950 лм, цветовая температура 6000 К (дневной свет); 3 – люминесцентная лампа Osram FLUORA T8 36W/77

(FL Osram) с акцентом в синей и красной областях спектра, световой поток 1400 лм, цветовая температура 7700 К (дневной свет). За контроль принимали условия естественного освещения в оранжерее. Ежедневная продолжительность освещения растений источниками искусственного света – 10 ч. Расстояние между растениями и лампами – 20 см. Облученность растений в эксперименте определяли на уровне верхушки растений с помощью спектрометра PAR PG200N.

Спектральные характеристики ламп и естественной облученности растений в условиях оранжереи приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Спектральные характеристики фотонной облученности растений

Table 1. Spectral characteristics of photon irradiation of plants

Исследуемый параметр	Искусственный источник излучения			Естественное освещение (контроль)
	LED Uniel	FL Narva	FL Osram	
PPFD, мкмоль/м ² /с	184,10	72,25	67,88	22,33
PFD, мкмоль/м ² /с	186,20	76,22	72,93	32,26
PFD-B: мкмоль/м ² /с % от PFD	25,45 13,67	21,59 28,33	18,71 25,65	4,90 15,19
PFD-G: мкмоль/м ² /с % от PFD	48,07 25,82	35,42 46,47	20,91 28,67	8,09 25,08
PFD-R: мкмоль/м ² /с % от PFD	110,5 59,34	15,24 20,00	28,25 38,74	9,35 28,98
PFD-FR: мкмоль/м ² /с % от PFD	2,03 1,09	2,64 3,46	4,51 6,18	9,38 29,08
R/FR	54,43	5,77	6,26	1,00

Примечание. PPFD (*photosynthetic photon flux density* – фотосинтетическая облученность) – количество фотонов, падающее на 1 м²/с в диапазоне длин волн 400–700 нм; PFD (*photon flux density* – фотонная облученность) – количество фотонов, падающее на 1 м²/с в диапазоне длин волн 380–780 нм; PFD-R, PFD-G, PFD-B, PFD-FR – фотонная облученность в красной (600–700 нм), зеленой (500–600 нм), синей (400–500 нм), дальней красной (700–780 нм) областях спектра соответственно.

Как видно из табл. 1, лампы различаются как по общей фотонной облученности (PFD), так и по фотосинтетической (PPFD): самые высокие значения этих параметров у лампы LED Uniel – 186,2 и 184,1 мкмоль/м²/с соответственно; у люминесцентных ламп FL Narva и FL Osram – 72,25 и 76,22; 67,88 и 72,93 мкмоль/м²/с соответственно. В условиях естественного освещения в оранжерее (контроль) эти показатели составляли 22,33 и 36,26 мкмоль/м²/с. Соотношение долей спектров у лампы LED Uniel – B₁₄: G₂₆: R₅₉; у лампы FL Narva – B₂₈: G₄₆: R₂₀; у лампы FL Osram – B₂₆: G₂₉: R₃₉. Таким образом, кроме параметра облученности растений (PPFD), в целом различия в спектрах излучения между лампами в вариантах опыта включают: долю красного спектра (R), которая у лампы LED Uniel составляет более 59,34 %, а синего (B) – всего 13,67 %; долю зеленого спектра (G), которая самая большая у лампы FL Narva (46,47 %); различные доли дальнего красного спектра (FR) в диапазоне излучения 710–740 нм в трех вариантах опыта: люминесцентные лампы FL Osram – 6,18 %, FL Narva – 3,46, светодиодный источник LED Uniel – 1,09 %. В контроле почти треть (29,08 %) от общего фотонного потока (PPFD) дневного падающего света в оранжерее приходится на долю дальнего красного света.

Исследовали морфологические параметры опытных растений: высоту, число, размеры и массу листьев и корней, а также удельную сухую массу листьев (мг/см²).

Статистическую обработку данных проводили при помощи программ Excel и Statistica. Для определения достоверности отличий между выборками применяли критерий Вилкоксона.

Результаты и их обсуждение. По всем морфологическим параметрам сеянцы обоих видов за период выращивания (120 дней) во всех вариантах с облучением превосходили растения, находящиеся в условиях естественного освещения в оранжерее (контроль). Как следует из данных, представленных на рис. 1 и в табл. 2, характер изменений морфологических параметров (высота растений, число и общая поверхность листьев, удельная, сухая и сырая масса листьев, корней) связан с интенсивностью фотосинтетической облученности растений (PPFD), которая у светодиодной лампы LED Uniel была самой высокой – 186,20 мкмоль/м²/с (см. табл. 1).

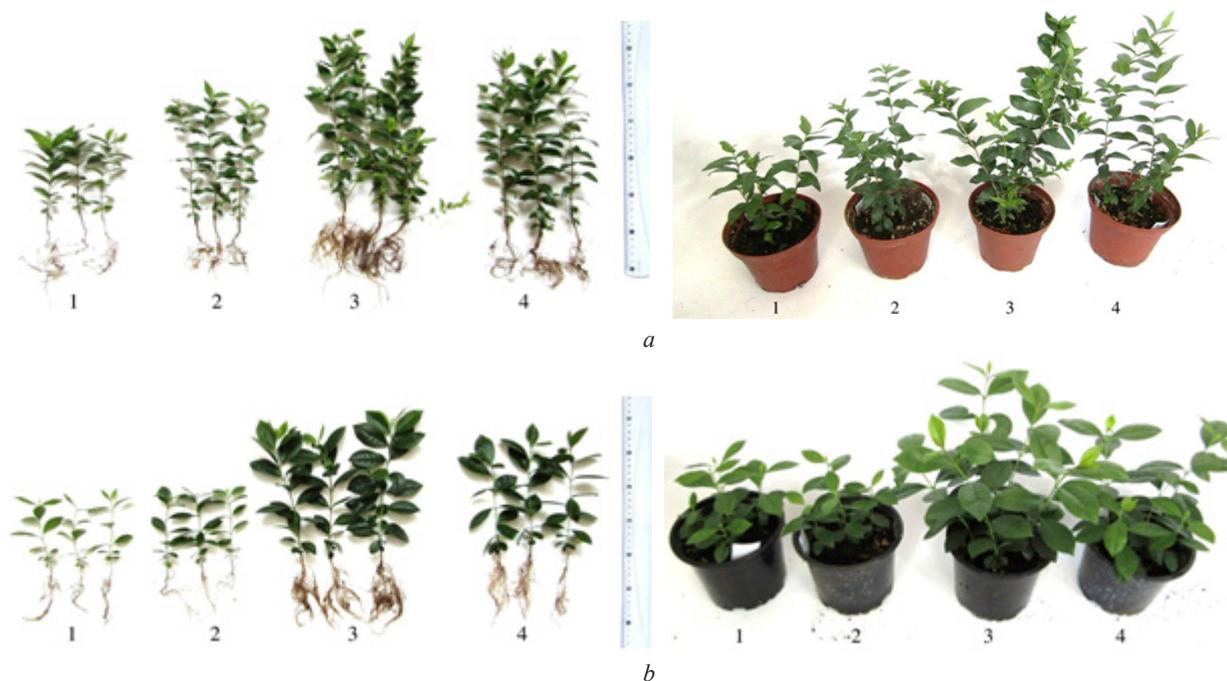


Рис. 1. *Myrtus communis* L. (a) и *Psidium cattleianum* Sabine (b) после 120 дней выращивания в горшечной культуре в условиях разной освещенности: 1 – условия естественной освещенности в оранжерее; 2 – FL Osram; 3 – LED Uniel; 4 – FL Narva

Fig. 1. *Myrtus communis* L. (a) and *Psidium cattleianum* Sabine (b) after 120 cultivation days in a pot culture under different lighting conditions: 1 – natural lighting conditions in a greenhouse; 2 – FL Osram; 3 – LED Uniel; 4 – FL Narva

Из морфологически значимых для вида признаков обратим внимание на размеры сформированной за период наблюдения листовой пластинки: длину и ширину, а также соотношение этих параметров (см. табл. 2). Видовые различия проявились в вариантах опыта в сравнении с контролем.

У растений *M. communis* размеры листа в вариантах опыта с облучением отличались от контрольных в сторону увеличения в вариантах с LED-лампой и FL Narva, что привело к изменению величины соотношения длина/ширина, а следовательно, и формы листа в обоих случаях.

У растений *P. cattleianum* в опытах с облучением LED-лампой размеры листовой пластинки в длину превосходили контрольный вариант – 5,67 см против 3,53 см, а по форме листовой пластинки листья растений в контрольном варианте были более удлиненными, чем в варианте с искусственным облучением, – 2,25 против 2,03–2,20 соответственно. Значительно увеличилась общая поверхность листьев у растений обоих видов в опытах с искусственными источниками освещения по сравнению с контрольными (табл. 2). В вариантах с облучением LED-лампой для растений *M. communis* этот показатель увеличился в 2,8 раза, а для растений *P. cattleianum* – почти в 5 раз.

Разрастание листовой пластинки, изменение ее размеров в длину и ширину, а также увеличение общей листовой поверхности у растений следует рассматривать в качестве ответной адаптивной реакции вида на избегание тени, обеспечивающей более эффективный захват света и характерной для растений, произрастающих под пологом леса и адаптированных к свет-дефицитной среде.

Т а б л и ц а 2. Влияние спектрального состава света на морфологические параметры растений *Myrtus communis* L. и *Psidium cattleianum* SabineT a b l e 2. Influence of the spectral composition of light on the morphological parameters of plants of *Myrtus communis* L. and *Psidium cattleianum* Sabine

Исследуемый параметр	Искусственный источник излучения			Естественное освещение (контроль)
	LED Uniel	FL Narva	FL Osram	
<i>Усредненные значения параметров на 1 растение (при n = 15)</i>				
Высота растений, см <i>M. communis</i> <i>P. cattleianum</i>	26,10 ± 0,79 ^a 18,42 ± 0,89 ^a	22,84 ± 0,88 ^b 15,52 ± 0,69 ^b	16,22 ± 1,07 ^c 10,24 ± 0,31	12,26 ± 0,16 ^{abc} 9,22 ± 0,69 ^{ab}
Число листьев, шт. <i>M. communis</i> <i>P. cattleianum</i>	84,40 ± 5,82 ^a 29,40 ± 2,56 ^a	52,40 ± 4,53 ^b 22,80 ± 0,80 ^b	30,40 ± 2,04 18,80 ± 0,49 ^c	20,80 ± 0,80 ^{ab} 14,40 ± 0,40 ^{abc}
Число побегов, шт. <i>M. communis</i> <i>P. cattleianum</i>	8,40 ± 1,03 ^a 2,20 ± 0,73	4,20 ± 0,86 ^b 1,00 ± 0,00	2,00 ± 0,63 1,00 ± 0,00	1,00 ± 0,00 ^{ab} 1,00 ± 0,00
Длина боковых побегов, шт. <i>M. communis</i> <i>P. cattleianum</i>	3,16 ± 0,47 1,82 ± 0,60	1,75 ± 0,39 –	1,42 ± 0,55 –	– –
Длина междоузлия, см <i>M. communis</i> <i>P. cattleianum</i>	1,46 ± 0,07 1,72 ± 0,13	1,20 ± 0,05 1,47 ± 0,14	1,19 ± 0,05 1,21 ± 0,13	1,32 ± 0,06 1,41 ± 0,16
Длина листа (L), см <i>M. communis</i> <i>P. cattleianum</i>	3,61 ± 0,06 ^a 5,67 ± 0,07 ^a	3,34 ± 0,04 ^b 4,72 ± 0,10 ^b	3,11 ± 0,04 3,52 ± 0,06	3,23 ± 0,09 ^{ab} 3,53 ± 0,12 ^{ab}
Ширина листа (W), см <i>M. communis</i> <i>P. cattleianum</i>	1,36 ± 0,02 ^a 2,80 ± 0,05 ^a	1,47 ± 0,02 ^b 2,24 ± 0,06 ^b	1,29 ± 0,02 1,60 ± 0,02	1,30 ± 0,03 ^{ab} 1,57 ± 0,05 ^{ab}
Длина/ширина листа (L/W) <i>M. communis</i> <i>P. cattleianum</i>	2,65 2,03	2,27 2,11	2,41 2,20	2,48 2,25
Поверхность листы (S), см ² <i>M. communis</i> <i>P. cattleianum</i>	23,33 ± 1,06 ^a 25,42 ± 3,06 ^a	18,28 ± 1,18 ^b 14,49 ± 1,68 ^b	10,59 ± 0,96 7,07 ± 0,63	8,25 ± 0,71 ^{ab} 5,19 ± 0,50 ^{ab}
Сырая масса листьев, г <i>M. communis</i> <i>P. cattleianum</i>	1,96 ± 0,09 ^a 2,54 ± 0,31 ^a	1,25 ± 0,08 ^b 1,25 ± 0,14 ^b	0,65 ± 0,06 0,52 ± 0,05	0,48 ± 0,04 ^{ab} 0,38 ± 0,04 ^{ab}
Сухая масса 1 см ² листьев, мг <i>M. communis</i> <i>P. cattleianum</i>	5,61 ± 0,13 4,99 ± 0,14	4,25 ± 0,32 3,45 ± 0,07	3,88 ± 0,11 2,76 ± 0,06	3,01 ± 0,13 3,06 ± 0,04
% сухой массы листьев <i>M. communis</i> <i>P. cattleianum</i>	34,9 ± 1,02 26,2 ± 0,30	32,5 ± 0,35 20,9 ± 0,29	32,9 ± 0,41 19,5 ± 0,06	27,1 ± 0,27 21,9 ± 0,50
Сырая масса растения, г <i>M. communis</i> <i>P. cattleianum</i>	3,54 ± 0,15 ^a 3,76 ± 0,40 ^a	2,07 ± 0,18 ^b 1,68 ± 0,21 ^b	1,10 ± 0,09 0,68 ± 0,06	0,77 ± 0,09 ^{ab} 0,56 ± 0,06 ^{ab}
Сырая масса стебля, г <i>M. communis</i> <i>P. cattleianum</i>	0,83 ± 0,06 ^a 0,40 ± 0,04 ^a	0,48 ± 0,05 0,18 ± 0,02 ^b	0,23 ± 0,03 0,07 ± 0,004	0,15 ± 0,04 ^a 0,07 ± 0,01 ^{ab}
Сырая масса корней, г <i>M. communis</i> <i>P. cattleianum</i>	0,75 ± 0,07 ^a 0,82 ± 0,06 ^a	0,34 ± 0,06 ^b 0,25 ± 0,05 ^b	0,22 ± 0,02 0,09 ± 0,01	0,14 ± 0,02 ^{ab} 0,11 ± 0,02 ^{ab}
Масса корней, % <i>M. communis</i> <i>P. cattleianum</i>	21,19 21,81	16,43 14,88	20,00 13,24	18,18 19,64

П р и м е ч а н и е. Одинаковыми латинскими буквами обозначены параметры, по которым различия существенны при $p < 0,05$.

В контролируемых условиях данного эксперимента с использованием источников искусственного освещения факторами, которые сигнализируют о приближении тени, являются увеличенные доли спектра слабо- или почти не поглощаемого растениями света в падающем излучении. И прежде всего это зеленый свет (G), а долю которого в составе спектра люминесцентной лампы FL Narva приходится почти половина всего спектра излучения – 46,47 % (см. табл. 1). В остальных вариантах опыта и в контроле на долю зеленого спектра приходится 25,08–28,67 % падающего света.

У растений есть сложные механизмы для восприятия приближения тени. Чтобы максимизировать свою способность конкурировать за свет, растения реагируют на тень удлинением стебля, физиологическими и гормональными изменениями. В последние годы в тепличном растениеводстве спектральный состав источников дополнительного освещения расширили за счет применения различных одиночных или комбинированных длин волн. Показано, что добавление инфракрасного света (FR) положительно влияет на фотосинтез и результирующую биомассу растений [13].

Излучение FR, как и величина соотношения R/FR, регулирует опосредованные фитохромами морфологические реакции и реакции развития растений, способствуя захвату излучения и выживанию в тени. Они оказывают заметное влияние на ростовые процессы и продуктивность растений в контролируемых условиях, а величина соотношения R/FR является наиболее часто обсуждаемым показателем в современных исследованиях [14].

В лесных сообществах верхние части крон деревьев поглощают основную долю красного спектра в диапазоне 650–680 нм. В то же время плохо поглощаемое ими FR-излучение проникает под полог, поэтому растения нижних ярусов находятся в условиях инфракрасного света FR. Среднесуточная величина соотношения R/FR, например, под пологом субтропического влажного леса в Австралии находится в пределах 0,4–0,8 и не подвержена сезонным изменениям [15].

C. Elkins, M. W. van Iersel [16] изучили влияние интенсивности дополнительного дальнего красного света в диапазоне от 4,0 до 68,8 мкмоль/м²/с на рост и морфологию проростков наперстянки «Далматинский персик» (*Digitalis purpurea* L.), выращиваемых под белым светодиодным освещением с плотностью потока фотосинтетических фотонов (PPFD) 186 ± 6,4 мкмоль/м²/с. По мере увеличения доли дальнего красного света сухая масса побега, сухая масса корня, высота растения, а также величина соотношения высота растения/количество листьев увеличивались на 38, 20, 38 и 34 % соответственно, а массовая доля корней уменьшилась на 16 %. Вместе с тем такие морфологические показатели, как удельная площадь листа и компактность кроны, не изменились [17].

Включение FR в спектр излучения источников света при выращивании растений длинного дня (LDP): герани (*Pelargonium hortorum* L. H. Bailey), петунии (*Petunia hybrida* E. Vilm.), львиного зева (*Antirrhinum majus* L.) и недотроги (*Impatiens walleriana* Hook. f.) при 20 °C и 18-часовом фотопериоде мало повлияло на фотосинтез, но увеличило захват излучения и рост растений, а также ускорило последующее цветение видов, избегающих тени [18].

Величина соотношения R/FR регулирует рост путем растяжения, варьируя высоту растений LDP. Высокое соотношение R/FR (в FR-дефицитной световой среде) задерживает начало цветения (но не развитие) у *Campanula carpatica* Jacq. и *C. grandiflora* Poir. ex Numan и подавляет развитие цветков (но не инициацию) у *Viola wittrockiana* Gams, а у некоторых видов FR-дефицитная световая среда может подавлять инициацию цветения или развитие [18].

Контроль морфологических параметров имеет важное значение при выращивании в теплицах высокодекоративных тропических растений короткого дня, например пуансеттии (*Euphorbia pulcherrima* Willd. ex Klotzsch) – молочая красивейшего (‘Рождественская звезда’), одного из наиболее экономически ценных видов декоративных горшечных культур в мире. Для получения компактной декоративной формы и уменьшения удлинения побегов обычно прибегают к применению регуляторов роста, которые потенциально опасны для здоровья человека и окружающей среды. В качестве альтернативы использованию гормонов у пуансеттии была изучена реакция на качество света. У этого растения выявлена чувствительность к изменению статуса фитохрома в конце светового дня – *end of day* (EOD). В зависимости от сорта 30-минутное облучение крас-

ным светом (EOD-R) подавляло удлинение побегов до 55 % по сравнению с облучением инфракрасным светом (EOD-FR). При этом снижение удлинения побегов и междоузлий при EOD-R коррелировало с более низкими уровнями гиббереллина и индол-3-уксусной кислоты на 29 и 21 % соответственно [19]. Показано, что фотоморфогенные реакции являются видоспецифичными, однако лишь некоторые из них желательны.

В ЦБС в опытах с выращиванием семян растений тропической флоры (кофе арабийского *Coffea arabica* L. и пестролистного сорта гибискуса китайского *Hibiscus rosa-sinensis* L. ‘Соопегі’) для получения качественной горшечной культуры показано, что использование краткосрочного (до 6 мес.) дополнительного облучения семян с фотопериодом 10 ч полноспектральным светильником LED Uniel и люминесцентными лампами (F. L. Narva, F. L. Osram) с интенсивностью FR в пределах от 2,03 до 4,51 мкмоль/м²/с в спектрах их излучения ускоряло рост и развитие растений относительно контрольного варианта, но имело видовую специфику. У теневыносливого вида *C. arabica* это привело к формированию хорошо облиственных компактных горшечных растений, а у светолюбивого сорта *H. rosa-sinensis* ‘Соопегі’ инициировало удлинение стебля и междоузлий. Культивирование *H. rosa-sinensis* ‘Соопегі’ с использованием светодиодных светильников LED Uniel вызывало более раннее вступление опытных растений в генеративную фазу: цветение наступало на 32 дня раньше, чем у растений, выращенных под люминесцентными лампами FL Narva, и на 51 день раньше по сравнению с растениями, облучаемыми люминесцентными лампами FL Osram [20].

Величина соотношения R/FR в нашем исследовании имеет следующие значения: 1,00 – в контроле (без дополнительного освещения), когда оба параметра находятся в фотохимическом равновесии; в пределах 5,77–6,26 – у люминесцентных ламп FL Narva и FL Osram и 54,43 – у светодиодного источника LED Uniel (табл. 1).

Из этого следует, что растения субтропического вида длинного дня (LDP) *M. communis* по высоте в варианте опыта с люминесцентной лампой FL Narva превышают контрольный вариант на 10,58 см, по числу листьев – на 31,6 шт., по общей листовой поверхности – на 10,03 см², а сухой массы на 1 см² листа – на 1,24 мг. Те же параметры у растений тропического вида короткого дня *P. cattleianum* превышают контрольные на 6,3 см, 8,4 шт., 9,3 и 0,39 мг соответственно. Прирост сухого вещества в листьях по сравнению с контролем у растений *M. communis* составил 5,4 %, а у растений *P. cattleianum* снизился на 1,0 %. Это связано не только с высокой долей G-излучения лампы FL Narva, но и с низкой долей ее главной, наиболее активно аккумулируемой листьями красной области спектра (R-излучение – 20,00 %), которая играет важную роль в развитии фотосинтетического аппарата, чистой скорости фотосинтеза и первичном метаболизме растений. Причем у тропического вида короткого дня *P. cattleianum* даже относительно высокое значение соотношения R/FR (5,77) не обеспечивает эффективного фотосинтеза (рис. 2).

Проведем сравнение по тем же показателям результатов облучения опытных растений светодиодным источником LED Uniel (R = 110,5 мкмоль/м²/с; R/FR = 54,43) с лучшим из вариантов облучения люминесцентной лампой – FL Narva (R = 15,24 мкмоль/м²/с; R/FR = 5,77). У субтро-

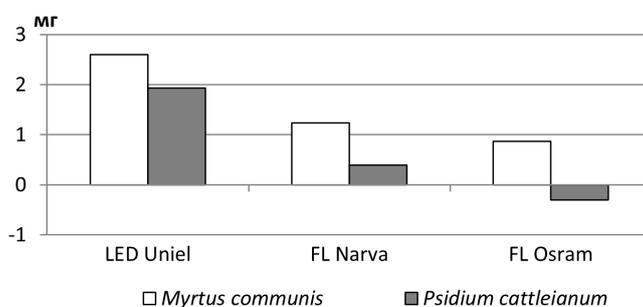


Рис. 2. Прирост сухой массы на 1 см² листа (мг) у опытных растений *Myrtus communis* L. и *Psidium cattleianum* Sabine в условиях разной освещенности относительно контроля

Fig. 2. Dry weight gain per 1 cm² leaf (mg) in experimental plants *Myrtus communis* L. and *Psidium cattleianum* Sabine under different lighting conditions relative to control

пического вида *M. communis* превышение по высоте растений, облученных LED-лампой, составляет 3,26 см, по числу листьев – 32,0 шт., по общей листовой поверхности – 5,05 см², по приросту сухого вещества – 1,36 мг/см², а у тропического вида короткого дня *P. cattleianum* – 2,9 см, 6,6 шт., 10,93 см², 1,54 мг/см² соответственно.

Следовательно, эффективность фотосинтеза у растений *M. communis* в варианте с облучением лампой LED Uniel (R/FR = 54,43) оказалась более чем вдвое, а у *P. cattleianum* – более чем в 10 раз выше, чем в вариантах с облучением люминесцентными лампами. Тропический вид короткого дня, как показали результаты данного эксперимента, по показателю прироста сухой массы на 1 см² листа в большей степени положительно реагируют на облучение красным светом, чем субтропический вид длинного дня (рис. 2).

Заключение. Изучено влияние интенсивности и спектрального состава света светодиодного (LED) и люминесцентных (FL) излучателей на морфогенез семян *Myrtus communis* L. и *Psidium cattleianum* Sabine (*Myrtaceae*) в малообъемной оранжерейной культуре в Центральном ботаническом саду НАН Беларуси. Показано, что по высоте растений, числу и общей поверхности листьев, а также по удельной сухой массе листа сеянцы обоих видов за 120 дней выращивания во всех вариантах с облучением превосходили контрольные растения. На прирост сухой массы на 1 см² листа (в мг по отношению к контролю), характеризующего продуктивность фотосинтеза, оказал влияние спектральный состав излучения, позволивший выявить межвидовые и межвариантные различия. В варианте с лампой FL Narva с плотностью общего фотонного потока PFD = 76,22 мкмоль/м²/с, с долей зеленого спектра PFD-G = 46,47 %, красного – PFD-R = 20,00 % и с соотношением R/FR = 5,77 у субтропического вида длинного дня *M. communis* он составил 1,24 мг, а у тропического вида короткого дня *P. cattleianum* – всего 0,4 мг. У обоих видов, облученных LED-лампой с плотностью фотонного потока PFD = 186,20 мкмоль/м²/с, с долей PFD-R = 59,34 % и при R/FR = 54,43 величина прироста составила 2,60 и 1,93 мг соответственно по отношению к контролю, но в механизме ответной реакции видов на облучение выявлены различия.

Для растения *M. communis* в варианте с облучением люминесцентной лампой FL Narva ее следует рассматривать в качестве типичной ответной реакции избегания тени в R-дефицитной световой среде с высокой долей в ней зеленого спектра. Для растений *P. cattleianum* эффективный прирост удельной сухой массы листа в варианте с облучением светодиодным источником LED Uniel легко объясняется высокой плотностью фотонного потока в красной области его спектра: PFD-R = 59,34 %. На основании полученных результатов можно заключить, что светодиодные источники являются наиболее эффективными в отношении продуктивности фотосинтеза и получения качественной продукции в малообъемной оранжерейной культуре растений короткого и длинного дня.

Список использованных источников

1. WFO (2023): World Flora Online [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.worldfloraonline.org>. – Date of access: 01.03.2023.
2. Кабушева, И. Н. Семейство *Myrtaceae* Juss. в коллекционном фонде оранжерейных растений ЦБС НАН Беларуси / И. Н. Кабушева // Интродукция, сохранение и использование биологического разнообразия флоры : материалы Междунар. науч. конф., посвящ. 90-летию Центр. бот. сада НАН Беларуси, Минск, 28 июня – 1 июля 2022 г. : в 2 ч. / редкол. : В. В. Титок (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2022. – Ч. I. – С. 151–153.
3. Belkov, V. Mechanism of plant adaptation to changing illumination by rearrangements of their photosynthetic apparatus / V. Belkov, E. Y. Garnik, Y. M. Konstantinov // Current Challenges in Plant Genetics, Genomics, Bioinformatics, and Biotechnology: Proc. of the Fifth int. sci. conf. PlantGen2019 (June 24–29, 2019, Novosibirsk, Russia) / eds. A. Kochetov, E. Salina ; Institute of Cytology and Genetics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. – Novosibirsk, 2019. – P. 101–103.
4. Agarwal, A. Impact of light-emitting diodes (LEDs) and its potential on plant growth and development in controlled-environment plant production system / A. Agarwal, S. D. Gupta // Curr. Biotechnol. – 2016. – Vol. 5, N 1. – P. 28–43. <https://doi.org/10.2174/2211550104666151006001126>
5. An RNA-seq analysis of grape plantlets grown *in vitro* reveals different responses to blue, green, red LED light, and white fluorescent light / Li C. X. [et al.] // Front. Plant Sci. – 2017. – Vol. 8, N 78. – P. 1–16. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00078>

6. Liu, H. Green light enhances growth, photosynthetic pigments and CO₂ assimilation efficiency of lettuce as revealed by ‘knock out’ of the 480–560 nm spectral waveband / H. Liu, Y. Fu, M. Wang // *Photosynthetica*. – 2017. – Vol. 55, N 1. – P. 144–152. <https://doi.org/10.1007/s11099-016-0233-7>
7. Wang, Y. Contributions of green light to plant growth and development / Y. Wang, K. M. Folta // *Am. J. Bot.* – 2013. – Vol. 100, N 1. – P. 70–78. <https://doi.org/10.3732/ajb.1200354>
8. Analyzing photosynthetic activity and growth of *Solanum lycopersicum* seedlings exposed to different light qualities / Q. Wu [et al.] // *Acta Physiol. Plant.* – 2014. – Vol. 36. – P. 1411–1420. <https://doi.org/10.1007/s11738-014-1519-7>
9. Hernández, R. Physiological responses of cucumber seedlings under different blue and red photon flux ratios using LEDs / R. Hernández, C. Kubota // *Environ. Exp. Bot.* – 2016. – Vol. 121. – P. 66–74. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2015.04.001>
10. Photomorphogenesis (With Diagram). *Plant Physiology* [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.biologydiscussion.com/plant-physiology-2/photomorphogenesis/photomorphogenesis-with-diagram-plant-physiology/23766>. – Date of access: 01.03.2023.
11. McCree, K. J. The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants / K. J. McCree // *J. Agric. Meteorol.* – 1972. – Vol. 9. – P. 191–216. [http://doi.org/10.1016/0002-1571\(71\)90022-7](http://doi.org/10.1016/0002-1571(71)90022-7)
12. Zhen, S. Far-red light is needed for efficient photochemistry and photosynthesis / S. Zhen, M. W. van Iersel // *J. Plant Physiol.* – 2017. – Vol. 209. – P. 115–122. <http://doi.org/10.1016/j.jplph.2016.12.004>
13. Sánchez-Lamas, M. Bottom up assembly of the phytochrome network / M. Sánchez-Lamas, C. D. Lorenzo, P. D. Cerdán // *PLOS Genetics*. – 2016. – Vol. 12, N 11. – P. 1–24. <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1006413>
14. Kump, B. The role of far-red light (FR) in photomorphogenesis and its use in greenhouse plant production / B. Kump // *Acta Agric. Slov.* – 2020. – Vol. 116, N 1. – P. 93–105. <https://doi.org/10.14720/aas.2020.116.1.1652>
15. Turnbull, H. Seasonal variation in the red/far-red ratio and photon flux density in an Australian sub-tropical rainforest / H. Turnbull, D. J. Yates // *Agric. For. Meteorol.* – 1993. – Vol. 64, N 1–2. – P. 111–127. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(93\)90096-Z](https://doi.org/10.1016/0168-1923(93)90096-Z)
16. Elkins, C. Supplemental far-red light-emitting diode light increases growth of foxglove seedlings under sole-source lighting / C. Elkins, M. W. van Iersel // *HortTechnology*. – 2020. – Vol. 30, N 5. – P. 564–569. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH04661-20>
17. Park, Y. Far-red radiation promotes growth of seedlings by increasing leaf expansion and whole-plant net assimilation / Y. Park, E. S. Runkle // *Environ. Exp. Bot.* – 2017. – Vol. 136. – P. 41–49. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2016.12.013>
18. Runkle, E. S. Specific functions of red, far-red, and blue light in flowering and stem extension of long-day plants / E. S. Runkle, R. D. Heins // *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* – 2001. – Vol. 126, N 3. – P. 275–282. <https://doi.org/10.21273/JASHS.126.3.275>
19. Impact of end-of-day red and far-red light on plant morphology and hormone physiology of poinsettia / M. A. Islam [et al.] // *Sci. Hortic.* – 2014. – Vol. 174. – P. 77–86. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.05.013>
20. Кабушева, И. Н. Влияние искусственного освещения на рост и развитие растений *Coffea arabica* L. и *Hibiscus rosa-sinensis* L. cv. Коопери / И. Н. Кабушева, Н. Л. Сак // *Науч. тр. Чебоксар. филиала Глав. бот. сада им. Н. В. Цицина РАН*. – 2020. – Вып. 15. – С. 31–37.

References

1. *WFO (2023): World Flora Online*. Available at: <http://www.worldfloraonline.org> (accessed 01.03.2023).
2. Kabusheva I. N. Family *Myrtaceae* Juss. in the collection fund of greenhouse plants of the Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus. *Introduktsiya, sokhraneniye i ispol'zovaniye biologicheskogo raznoobraziya flory: materialy Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii, posvyashchennoi 90-letiyu Tsentral'nogo botanicheskogo sada Natsional'noi akademii nauk Belarusi (28 iyunya – 1 iyulya 2022 goda, Minsk, Belarus)*. [Introduction, conservation and use of the biological diversity of flora: materials of the International scientific conference dedicated to the 90th anniversary of the Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus (June 28 – July 1, 2022, Minsk, Belarus)]. Minsk, 2022, pt. 1, pp. 151–153 (in Russian).
3. Belkov V., Garnik E. Y., Konstantinov Y. M. Mechanism of plant adaptation to changing illumination by rearrangements of their photosynthetic apparatus. *Current Challenges in Plant Genetics, Genomics, Bioinformatics, and Biotechnology: Proceedings of the Fifth international scientific conference PlantGen2019 (Novosibirsk, Russia, 24–29 June, 2019)*. Novosibirsk, 2019, pp. 101–103.
4. Agarwal A., Gupta S. D. Impact of light-emitting diodes (LEDs) and its potential on plant growth and development in controlled-environment plant production system. *Current Biotechnology*, 2016, vol. 5, no. 1, pp. 28–43. <https://doi.org/10.2174/2211550104666151006001126>
5. Li Ch., Xu Z.-G., Chang S.-X., Dong R.-Q. An RNA-seq analysis of grape plantlets grown *in vitro* reveals different responses to blue, green, red LED light, and white fluorescent light. *Frontiers in Plant Science*, 2017, vol. 8, no. 78, pp. 1–16. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00078>
6. Liu H., Fu Y., Wang M. Green light enhances growth, photosynthetic pigments and CO₂ assimilation efficiency of lettuce as revealed by ‘knock out’ of the 480–560 nm spectral waveband. *Photosynthetica*, 2017, vol. 55, no. 1, pp. 144–152. <https://doi.org/10.1007/s11099-016-0233-7>
7. Wang Y., Folta K. M. Contributions of green light to plant growth and development. *American Journal of Botany*, 2013, vol. 100, no. 1, pp. 70–78. <https://doi.org/10.3732/ajb.1200354>
8. Wu Q., Su N., Shen W., Cui J. Analyzing photosynthetic activity and growth of *Solanum lycopersicum* seedlings exposed to different light qualities. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2014, vol. 36, pp. 1411–1420. <https://doi.org/10.1007/s11738-014-1519-7>

9. Hernández R., Kubota C. Physiological responses of cucumber seedlings under different blue and red photon flux ratios using LEDs. *Environmental and Experimental Botany*, 2016, vol. 121, pp. 66–74. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2015.04.001>
10. *Photomorphogenesis (With Diagram)*. *Plant Physiology*. Available at: <https://www.biologydiscussion.com/plant-physiology-2/photomorphogenesis/photomorphogenesis-with-diagram-plant-physiology/23766> (accessed 01.03.2023).
11. McCree K. J. The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants. *Journal of Agricultural Meteorology*, 1972, vol. 9, pp. 191–216. [http://doi.org/10.1016/0002-1571\(71\)90022-7](http://doi.org/10.1016/0002-1571(71)90022-7)
12. Zhen S., van Iersel M. W. Far-red light is needed for efficient photochemistry and photosynthesis. *Journal of Agricultural Meteorology*, 2017, vol. 209, pp. 115–122. <http://doi.org/10.1016/j.jpiph.2016.12.004>
13. Sánchez-Lamas M., Lorenzo C. D., Cerdán P. D. Bottom up assembly of the phytochrom network. *PLOS Genetics*, 2016, vol. 12, no. 11, pp. 1–24. <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1006413>
14. Kump B. The role of far-red light (FR) in photomorphogenesis and its use in greenhouse plant production. *Acta Agriculturae Slovenica*, 2020, vol. 116, no. 1, pp. 93–105. <https://doi.org/10.14720/aas.2020.116.1.1652>
15. Turnbull H., Yates D. J. Seasonal variation in the red/far-red ratio and photon flux density in an Australian sub-tropical rainforest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1993, vol. 64, no. 1–2, pp. 111–127. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(93\)90096-Z](https://doi.org/10.1016/0168-1923(93)90096-Z)
16. Elkins C., van Iersel M. W. Supplemental far-red light-emitting diode light increases growth of foxglove seedlings under sole-source lighting. *HortTechnology*, 2020, vol. 30, no. 5, pp. 564–569. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH04661-20>
17. Park Y., Runkle E. S. Far-red radiation promotes growth of seedlings by increasing leaf expansion and whole-plant net assimilation. *Environmental and Experimental Botany*, 2017, vol. 136, pp. 41–49. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2016.12.013>
18. Runke E. S., Heins R. D. Specific functions of red, far-red, and blue light in flowering and stem extension of long-day plants. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 2001, vol. 126, no. 3, pp. 275–282. <https://doi.org/10.21273/JASHS.126.3.275>
19. Islam Md. A., Tarkowska D., Clarke J. L., Blystad D.-R. Impact of end-of-day red and far-red light on plant morphology and hormone physiology of poinsettia. *Scientia Horticulturae*, 2014, vol. 174, no. 1, pp. 77–86. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.05.013>
20. Kabusheva I. N., Sak N. L. Effect of artificial lighting on the growth and development of *Coffea arabica* L. and *Hibiscus rosa-sinensis* L. cv. Cooperi. *Nauchnye trudy Cheboksarskogo filiala Glavnogo botanicheskogo sada im. N. V. Tsitsina RAN* [Scientific works of the Cheboksary branch of the Main Botanical Garden named after N. V. Tsitsina RAS], 2020, iss. 15, pp. 31–37 (in Russian).

Информация об авторах

Гетко Нелли Владимировна – д-р биол. наук, доцент, гл. науч. сотрудник. Центральный ботанический сад НАН Беларуси (ул. Сурганова, 2в, 220012, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: n.hetko@cbg.org.by

Кабушева Ирина Николаевна – канд. биол. наук, вед. науч. сотрудник. Центральный ботанический сад НАН Беларуси (ул. Сурганова, 2в, 220012, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: I.Kabusheva@cbg.org.by

Сак Наталья Леонидовна – науч. сотрудник. Центральный ботанический сад НАН Беларуси (ул. Сурганова, 2в, 220012, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: nkorolevas@mail.ru

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

Information about the authors

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

Irina N. Kabusheva – Ph. D. (Biol.), Leading Researcher. Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus (2v, Surganov Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: I.Kabusheva@cbg.org.by

Nataliya L. Sak – Researcher. Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus (2v, Surganov Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nkorolevas@mail.ru

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

ISSN 1029-8940 (Print)
ISSN 2524-230X (Online)
УДК 581.1.03:535.2
<https://doi.org/10.29235/1029-8940-2023-68-4-282-292>

Поступила в редакцию 20.10.2022
Received 20.10.2022

**О. В. Молчан¹, Л. В. Обуховская¹, Т. Н. Куделина¹, Н. И. Астасенко²,
М. И. Баркун², Ю. В. Трофимов²**

¹*Институт экспериментальной ботаники имени В. Ф. Купревича НАН Беларуси,
Минск, Республика Беларусь*

²*Центр светодиодных и оптоэлектронных технологий НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь*

АКТИВАЦИЯ LED-ОСВЕЩЕНИЕМ ФОТОСИНТЕТИЧЕСКИХ И РОСТОВЫХ ПРОЦЕССОВ РАСТЕНИЙ ТОМАТА В УСЛОВИЯХ ОПЫТНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОГО УЧАСТКА

Аннотация. Показано преимущество использования светодиодных облучательных приборов FLORA LED по сравнению с лампами ДНаТ (ДНаТ 1000) для культивирования растений высокостебельных сортов томата в условиях производства. При светодиодном освещении хорошо сбалансированного спектрального состава растения томата уже в стадии вегетативного роста (рассады) по основным физиологическим показателям (сухая масса и накопление сухого вещества вегетативных органов, содержание фотосинтетических пигментов, скорость выделения кислорода при фотосинтезе, коэффициент фотосинтетической эффективности) превосходили растения, выращенные при освещении лампами ДНаТ. Предполагается, что повышенная фотосинтетическая активность и интенсивные процессы роста и развития обеспечили растениям, выращенным при LED-освещении, более высокий адаптивный потенциал и приживаемость при пересадке, раннее плодоношение и повышение урожайности.

Ключевые слова: LED-освещение, спектральный состав, *Lycopersicon esculentum* Mill.

Для цитирования: Активация LED-освещением фотосинтетических и ростовых процессов растений томата в условиях опытно-производственного участка / О. В. Молчан [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. биол. наук. – 2023. – Т. 68, № 4. – С. 282–292. <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2023-68-4-282-292>

**Olga V. Molchan¹, Lyudmila V. Obukhovskaya¹, Tatiana N. Kudelina¹, Nikolay I. Astasenko²,
Mikhail I. Barkun², Yuri V. Trofimov²**

¹*V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Republic of Belarus*

²*Center for LED and Optoelectronic Technologies of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Republic of Belarus*

ACTIVATION OF GROWTH AND PHOTOSYNTHETIC PROCESSES OF TOMATO PLANTS BY LED LIGHTING UNDER PRODUCTION CONDITIONS

Abstract. The advantage of FLORA LED lighting in comparison with HPS lamps for cultivation of tall tomato varieties under production conditions is shown. Under LED illumination with well-balanced spectral composition, the main growth and physiological parameters of tomato juvenile plants (such as dry weight and accumulation of dry matter of vegetative organs, content of photosynthetic pigments, rate of oxygen release during photosynthesis, coefficient of photosynthetic efficiency, time of flowering onset) were superior to plants grown under HPS lamp illumination. It is assumed that increased photosynthetic activity, as well as more intensive growth and development processes provided a higher adaptive potential and survival during transplantation, early fruiting and higher yields to plants grown under LED lighting.

Keywords: LED lighting, spectral composition, *Lycopersicon esculentum* Mill.

For citation: Molchan O. V., Obukhovskaya L. V., Kudelina T. N., Astasenko N. I., Barkun M. I., Trofimov Yu. V. Activation of growth and photosynthetic processes of tomato plants by LED lighting under production conditions. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya biyalagichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological series*, 2023, vol. 68, no. 4, pp. 282–292 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2023-68-4-282-292>

Введение. Разработка и внедрение энергосберегающих технологий в различные области хозяйственной деятельности является актуальной задачей на современном этапе развития экономики практически всех стран мира. Особенно важна сегодня оптимизация производства продуктов питания, поэтому остро стоит проблема повышения продуктивности растениеводства, в том

числе в условиях закрытого грунта. Совершенно необходимым условием для успешного тепличного производства, получения продукции при высоких производительности и качестве является использование искусственного освещения. Разработки технологического облечения в современном сельскохозяйственном производстве должны быть основаны на фундаментальных фотобиологических эффектах, конкретных агротехнических подходах и световых технологиях, предусматривающих применение высокоэффективного светотехнического оборудования. Традиционно источником искусственного оптического излучения в теплицах являются натриевые лампы высокого давления. Несмотря на то что их спектр считается не самым оптимальным для роста и развития растений, именно благодаря использованию этих ламп в сочетании с передовой агротехникой удалось достичь высоких уровней продуктивности целого ряда культур. Возможно, это обусловлено тем, что в промышленных теплицах искусственные источники света применяются, как правило, совместно с естественным освещением. Поэтому даже в самое «темное» время года (декабрь–январь), когда доля искусственного излучения достигает 90 %, суммарный световой поток получает существенную добавку от естественного освещения в синей части физиологически активной радиации (ФАР), обеспечивающую необходимое фоторегуляторное действие на растения.

На широте Беларуси продолжительность светового периода поздней осенью, в зимний период и ранней весной не превышает 8–10 ч, а интенсивность освещения, как правило, очень низкая. В то же время фотопериод для культивирования растений чаще всего должен составлять 17–18 ч. Также растениям важно получить достаточную дозу энергии света, спектральный состав которого должен быть хорошо сбалансирован для управления процессами роста и дифференцировки на всех уровнях – от клеточного до организменного. Эффективное функционирование фотосинтетического аппарата, в том числе биосинтез хлорофилла и транспорт электронов, регуляция роста и развития растений осуществляются с участием систем фотосинтеза и фотоморфогенеза, поглощающих излучение во всем диапазоне ФАР (380–780 нм). Следует также отметить, что влияние спектрального состава и интенсивности света на метаболизм зависит от стадии развития растения [1].

В связи с изложенным выше в настоящее время интенсивно изучают и внедряют в производство в тепличных комбинатах республики светодиодные (Light Emission Diodes – LED) источники света. Современные светодиодные облечатели обладают рядом важных преимуществ по сравнению с традиционными лампами. LED-освещение практически не влияет на температурный режим растения и не приводит к его перегреву [2]. Современные LED-облечатели по энергоэффективности превосходят люминесцентные лампы и лампы накаливания и не уступают газоразрядным лампам [3]. Отдельные светодиоды излучают свет в узком диапазоне – 20–30 нм, и различные их комбинации позволяют получить облечатель практически с любым спектральным составом в области ФАР и эффективно управлять ростом, морфогенезом растений, урожайностью и даже качеством получаемой продукции [4–6]. К настоящему времени накоплено достаточно много информации, указывающей на возможность использования излучателей на основе светодиодов для возделывания овощных культур в регулируемых условиях, а также на влияние света различного спектрального состава на синтез метаболитов и продуктивность растений [5]. В то же время фитоизлучатели многих производителей включают свет только в красном ($\lambda_{\max} = 660$ нм) и синем ($\lambda_{\max} = 450$ нм) спектральных диапазонах, которых явно недостаточно для эффективного управления ростом и развитием растений. Под действием такого света неправильно функционирует фотосинтетический аппарат и может снижаться продуктивность тепличных культур. Кроме того, усложняется работа персонала теплиц вследствие некомфортного для человека освещения [1].

На фоне быстрого развития светодиодных технологий происходят радикальные изменения на рынке тепличного освещения. Превысив уровень натриевых фитооблечателей по энергоэффективности, светодиодные превосходят их также по возможности оптимизации спектральных характеристик с учетом видовых особенностей конкретных культур и задач выращивания, а также по возможностям управления системой электроосвещения теплиц. Принципиальное отличие источников света для наружного освещения открытых пространств и внутренних поме-

щений зданий и сооружений от фитооблучателей для теплиц заключается в том, что первые обеспечивают информацией человека для его ориентации в окружающем пространстве, а вторые являются одновременно и информационно-регуляторным, и энергетическим оборудованием для воздействия на растения и получения хозяйственно-полезного урожая. В то же время внедрение новых светодиодных источников вызывает необходимость изменения технических решений и подходов при проектировании культивационных сооружений защищенного грунта [6]. Однако, к сожалению, для реализации потенциальных возможностей светодиодных фитооблучателей, например с оптимальным для получения хозяйственно-полезного урожая спектром излучения, пока не разработаны научные основы для проектирования теплиц и других культивационных сооружений защищенного грунта. Динамичное развитие светокультуры и появление светодиодных фитооблучателей подчеркнули важность разработки и формирования нормативно-технической базы технологического облучения промышленных теплиц и новых систем выращивания растений многоярусного типа, которая фактически отсутствует. Для нашей страны такие разработки сегодня особенно актуальны.

Одной из важнейших культур тепличного производства являются томаты, особенно высокостебельных сортов [7]. Широкое распространение они получили благодаря высокой пищевой и биологической ценности плодов, содержащих ряд таких биологически активных веществ, как органические кислоты, пектины, витамины С, В₁, В₂, а также каротиноиды, включая β-каротин и ликопин [8]. Исследования показали, что с использованием LED-освещения можно выращивать многие растения, в том числе и томат [9, 10]. Например, растения томата, выращенные с использованием монохроматического красного света, в фазе вегетативного роста имели наибольшую длину гипокотыля и высоту [11]. Облучение растений монохроматическим синим цветом приводило к повышению скорости транспирации и устьичной проводимости [11]. Светодиодное освещение со спектром зеленый + красный (1 : 1) обеспечивало накопление сухой массы надземной части и корней и повышение содержания хлорофилла в листьях [11]. Использование LED-источника света, содержащего только синие и красные светодиоды, при соотношении красного и синего 1 : 7 по плотности потока фотонов стимулировало образование вегетативной биомассы растений томата черри по сравнению с люминесцентным освещением [12]. Интенсивный рост рассады сохранялся и после пересадки, что приводило к увеличению урожая [12].

Таким образом, изучение действия монохроматического красного и синего света, а также соотношения красной и синей областей спектра освещения на рост растений, включая тепличные культуры, проводятся достаточно давно. Но только в последнее время внимание исследователей привлекло действие света регуляторных частей спектра ФАР, в частности зеленого и дальнего красного. Поэтому влияние на растения света с разным соотношением частей спектра при LED-освещении, включающем все длины волн ФАР, все еще недостаточно изучено. Это связано также с тем, что ответная реакция растений на свет отдельных частей спектра (при монохромном освещении) или же их сочетания (полихромное освещение) является видоспецифичной и определяется генотипом культуры [6]. Более того, требования к спектральному составу могут отличаться не только у видов, но даже у разных сортов одной культуры [1]. Сегодня очевидно, что разработка и использование специализированного источника света с оптимальным спектральным составом, соответствующим потребностям конкретного вида и сорта растения, позволит не только увеличить урожайность, но и улучшить качество плодов. Хотя исследователи давно высказывали идею о необходимости такого источника света, появление облучателя нового типа в последнее время становится возможным лишь благодаря развитию светодиодных технологий. Государственное предприятие «ЦСОТ НАН Беларуси» разработало источники света на основе светодиодов серии FLORA LED для создания энергоэффективного искусственного освещения в теплицах. Возможность оптимизации спектральных характеристик современных LED-облучателей, вполне вероятно, позволит повысить продуктивность культур закрытого грунта [1, 2]. При этом особенно важно проводить исследования не только в лабораторных условиях, но и в условиях реального производства.

Целью данной работы было изучение влияния искусственного освещения на основе светодиодных облучательных приборов FLORA LED на рост и интенсивность фотосинтеза растений

томата в стадии вегетативного роста (рассады) в сравнении с освещением натриевыми лампами высокого давления (ДНАТ 1000) и оценка эффективности использования LED-освещения для выращивания высокостебельных сортов томата в условиях опытно-производственного участка.

Объекты и методы исследования. Объектом исследования были растения в фазе вегетативного роста (рассада) томатов *Lycopersicon esculentum* Mill. сорта Тореро. Растения выращивали в условиях опытно-производственного участка на КУП «Минская овощная фабрика» малообъемным гидропонным способом на минеральной вате, с соблюдением всех требований используемой производственной технологии. Эксперименты проводили в течение 2015–2018 гг. при выполнении проекта, финансируемого инновационным фондом Мингорисполкома.

Для искусственного освещения растений на контрольном участке использовали светильники с натриевыми лампами высокого давления (ДНАТ 1000), на экспериментальном участке – светодиодные фитооблучатели FLORA LED производства Республиканского научно-производственного унитарного предприятия ЦСОТ НАН Беларуси. Средняя горизонтальная облученность на обоих участках составляла: фотонная – 200 мкмоль/(с·м²), энергетическая – 40 Вт/м². Фотопериод на обоих участках составлял 17 ч, дневная доза облучения растений – 12,2 моль/м² (2,5 МДж/м²). Спектральный состав излучения светодиодных фитооблучателей FLORA LED (в фотонной системе измерения): в диапазоне 380–499 нм – 12,9 %; 500–599 нм – 28,3; 600–699 нм – 49,1; 700–780 нм – 9,7 %.

Календарный возраст и климатические условия культивирования рассады при ДНАТ- и LED-освещении были одинаковыми. Анализ физиологических параметров проводили в промежутки времени от посева семян до переноса растений на постоянное место культивирования в производственном отделении. Определяли основные морфометрические параметры: сырую и сухую массу надземной части, длину стебля и междоузлий, количество междоузлий, листьев и цветков растения. Концентрацию фотосинтетических пигментов (хлорофиллов *a*, *b*) и каротиноидов оценивали согласно D. Wettstein [13]. Удельную поверхностную плотность листьев (УППЛ) рассчитывали как отношение сухой массы листа к его площади [14]. Скорости дыхания и фотосинтеза исследовали с помощью системы PlantVital®5030 (INNO-Concept GmbH, Германия). По соотношению скоростей чистой продукции O₂ при фотосинтезе и потребления его в процессе темнового дыхания рассчитывали коэффициент фотосинтетической эффективности (KphA) по формуле $KphA = S/R$, где *S* – скорость фотосинтеза, *R* – скорость дыхания.

Объем экспериментальной выборки для исследований в каждом варианте составлял 15 растений. Данные на гистограммах представлены в виде средних арифметических значений и стандартного отклонения.

Результаты и их обсуждение. По внешнему виду растения томата *Lycopersicon esculentum* Mill. сорта Тореро в возрасте 27 сут, выращенные под фитооблучателями FLORA LED и лампами ДНАТ 1000, различаются (при LED-освещении они выглядят более компактными).

Оценка накопления биомассы вегетативными органами показала, что различий в накоплении сырой вегетативной массы между вариантами не наблюдается (рис. 1, *a*). В то же время сухая масса надземной части растения и содержание сухого вещества при LED-освещении были больше, а к 40-м суткам культивирования – выше почти в 2 раза, чем под лампами ДНАТ (рис. 1, *b*, *c*). Показатель УППЛ, который позволяет оценить уровень накопления сухого вещества листовой пластинкой, косвенно характеризует толщину листа и, как правило, коррелирует с интенсивностью фотосинтеза, также был значительно больше (в 4–5 раз) при воздействии LED-облучателей (рис. 1, *d*). Очевидно, это обусловлено повышенным фотосинтетическим и биосинтетическим потенциалом растений при используемом светодиодном освещении, поскольку для интенсивного роста и развития важно, чтобы они получали хорошо сбалансированный по спектру свет.

При оптимизации светового режима культивирования следует ориентироваться также на оценку содержания фотосинтетических пигментов и активность работы фотосинтетического аппарата растений. В нашей работе были определены содержание хлорофиллов и каротиноидов (рис. 2), скорость выделения кислорода при фотосинтезе и поглощения при дыхании (рис. 3, *a*) и коэффициент фотосинтетической эффективности *KphA* (рис. 3, *b*). Показано значительное (в 1,5–1,8 раза) повышение содержания сумм фотосинтетических пигментов в листьях растений

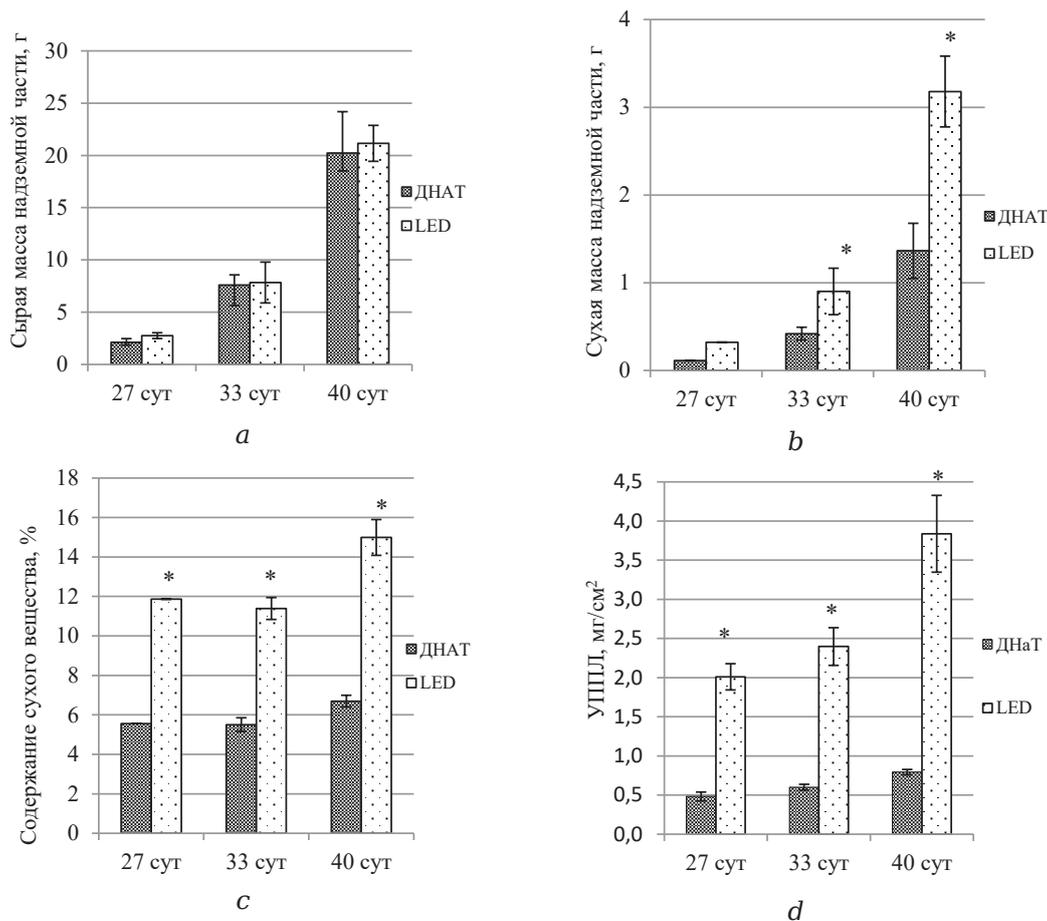


Рис. 1. Влияние ДНаТ- и LED-освещения на накопление сырой (a) и сухой (b) массы, содержание сухого вещества (c), удельную поверхностную плотность листьев (d) растений томата *Lucopersicon esculentum* Mill. * – различия достоверны по сравнению с контрольным ДНаТ-вариантом при $p \leq 0,05$

Fig. 1. HPS and LED lighting effect on the accumulation of fresh (a) and dry (b) weight, dry matter content (c), specific surface density of leaves (d) of tomato seedlings. * – differences are significant compared with the control HPS-variant at $p \leq 0.05$

под действием LED-освещения в сравнении контрольными ДНаТ-вариантами (см. рис. 2, a, b). Различия регистрировали в течение всего периода роста. Схожие эффекты у растений отмечены и при сравнении содержания хлорофилла a и хлорофилла b при разных вариантах освещения (рис. 2, c, d).

Светодиодное освещение стимулировало также интенсивность выделения кислорода фотосинтетическим аппаратом (рис. 3). У растений томата, культивируемых под лампами ДНаТ, уровень фотосинтетической активности составлял в среднем $0,6 \text{ мкмоль } \text{O}_2/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ и практически не менялся с возрастом. В то же время при LED-освещении в течение всего периода роста происходила интенсификация фотосинтетической активности, а к 40-м суткам культивирования наблюдали повышение уровня выделения кислорода до $0,8\text{--}0,9 \text{ мкмоль } \text{O}_2/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ и достоверные отличия от контрольного ДНаТ-варианта. Значимых различий в активности темнового дыхания у ДНаТ- и LED-вариантов обнаружено не было. Коэффициент фотосинтетической эффективности K_{phA} при светодиодном освещении также увеличивался с течением времени культивирования, а под лампами ДНаТ, наоборот, снижался (рис. 3, a, b). K_{phA} отражает физиологические состояние растения, обобщая характеристики двух важнейших процессов – фотосинтеза и дыхания. Известно, что под действием неблагоприятных факторов у растений часто происходит сдвиг в соотношении процессов дыхания и фотосинтеза в сторону активации процессов потребления O_2 и уменьшения его образования и, таким образом, уменьшается

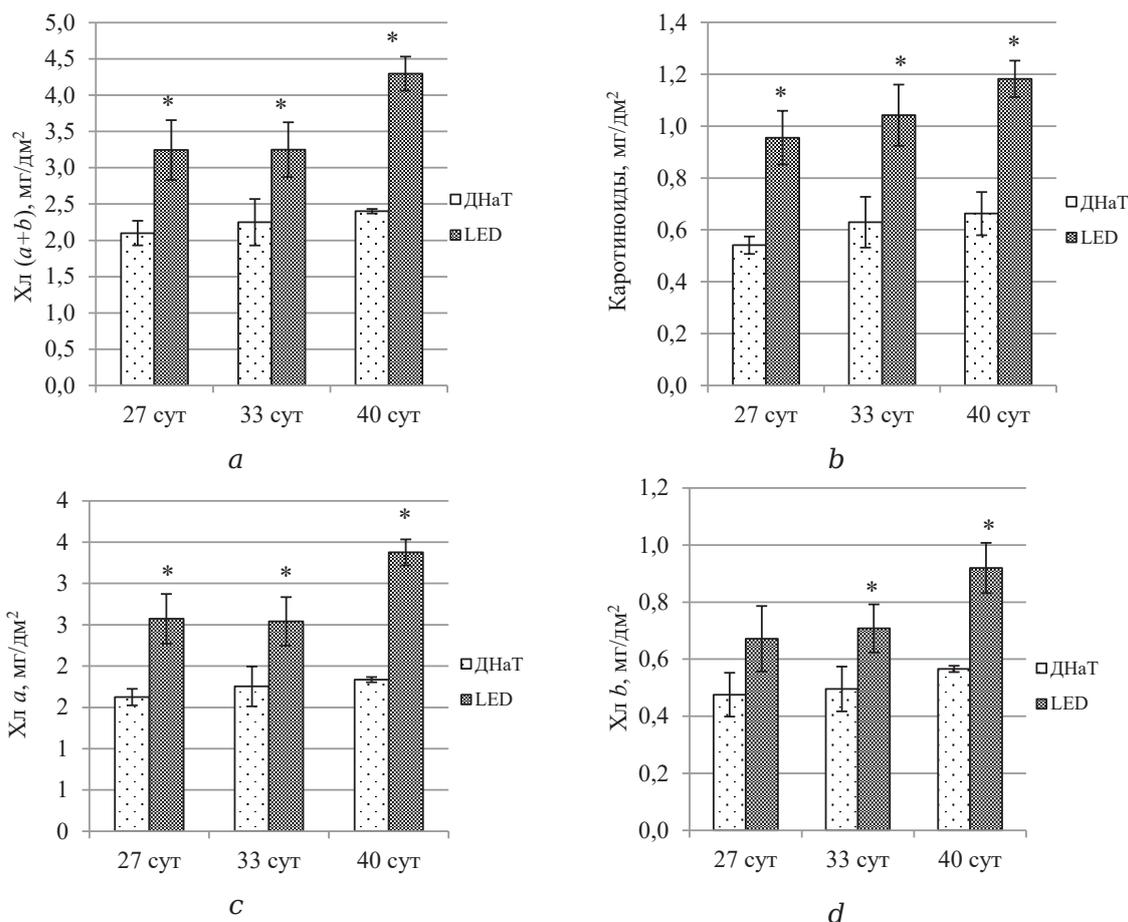


Рис. 2. Содержание суммы хлорофиллов (a), каротиноидов (b), хлорофилла a (c), хлорофилла b (d) в листьях растений томата *Lycopersicon esculentum* Mill. при ДНаТ- и LED-освещении. * – различия достоверны по сравнению с контрольным ДНаТ-вариантом при $p \leq 0,05$

Fig. 2. Content of total chlorophylls (a), carotenoids (b), chlorophyll a (c), chlorophyll b (d) in leaves of tomato plants *Lycopersicon esculentum* Mill. at HPS and LED lighting. * – differences are significant compared with the control HPS-variant at $p \leq 0.05$

коэффициент K_{phA} [15]. Поэтому снижение этого коэффициента свидетельствует скорее о неблагоприятных для растения условиях роста, в то время как его повышение является весомым аргументом в пользу эффективного использования фотосинтетическим аппаратом растений LED-освещения. Из приведенных выше данных следует, что тестируемое LED-освещение оптимизирует процессы фотосинтеза растений томата *Lycopersicon esculentum* Mill. в течение первых 40 сут вегетационного периода.

Оценка морфометрических параметров показала значительное увеличение длины стебля и междоузлий при равном их количестве у растений, выращенных под лампами ДНаТ, по сравнению с LED-вариантом (рис. 4, a–c). Удлинение междоузлий и более низкий уровень образования сухого вещества свидетельствуют об интенсификации процессов роста клеток путем растяжения, происходящих скорее за счет поглощения воды, а не в результате образования органических соединений, а значит, о недостаточно эффективном освещении растений томата лампами ДНаТ по сравнению с LED-облучателями. По количеству листьев достоверных отличий между растениями также не обнаружено (рис. 4, d). В то же время только у растений томата, культивируемых при LED-освещении, к 40-м суткам было отмечено появление генеративных органов, т. е. они раньше переходили в фазу цветения (рис. 4, b). Это может быть связано как с более высокой дозой эффективных для фотосинтеза длин волн в световом потоке, так и с оптимизацией регуляторных возможностей, обеспеченных сбалансированным спектральным соста-

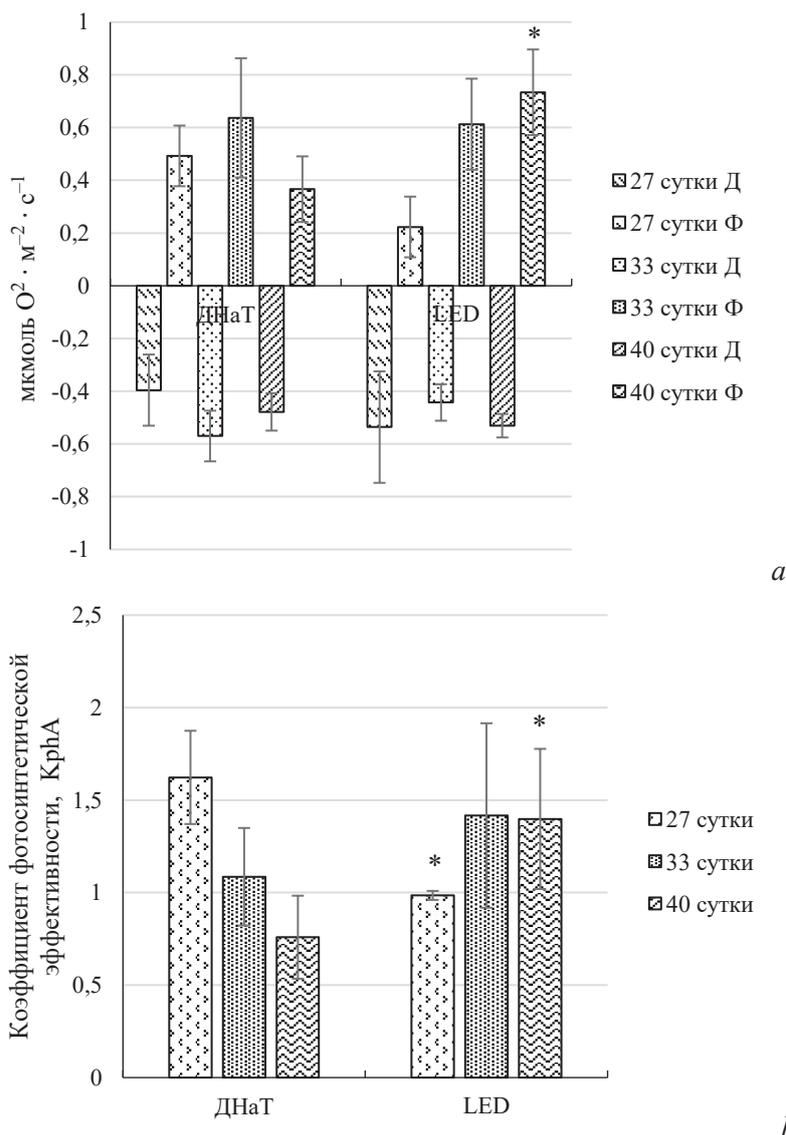


Рис. 3. Влияние ДНаТ- и LED-освещения на интенсивность выделения кислорода при фотосинтезе (Ф) и его поглощения при дыхании (Д) (а), коэффициент фотосинтетической эффективности (b) в листьях растений томата *Lucopersicon esculentum* Mill. * – различия достоверны по сравнению с контрольным ДНаТ-вариантом при $p \leq 0,05$

Fig. 3. Illumination influence on the intensity of release (F) and absorption (D) of oxygen during photosynthesis and respiration (a), coefficient of photosynthetic efficiency (b) in leaves of tomato plants *Lucopersicon esculentum* Mill.

* – differences are significant compared with the control HPS-variant at $p \leq 0.05$

вом используемого в эксперименте фитооблучателя FLORA LED. Известно, что накопление витаминов, синтез фитогормонов и других регуляторных сигнальных молекул находятся под контролем света определенных длин волн [1]. Таким образом, важным достоинством облучателей нового поколения являются уникальные возможности для оптимизации светового режима культивирования растений, включая эффективную стимуляцию фоторегуляторных механизмов. Основываясь на полученных данных, можно также предположить, что ускоренное вступление в генеративную фазу при светодиодном освещении обеспечит впоследствии раннее и более интенсивное плодоношение растений высокостебельных сортов томата.

Выращенные в условиях LED-освещения растения (рассада) уже через 14 сут культивирования в производственном отделении имели больше цветковых кистей, чем растения при традиционном освещении лампами ДНаТ, а в возрасте 60 сут были получены первые плоды. Через 3,5 мес. от начала вегетации LED-растения характеризовались в среднем на 30 % более высокой урожай-

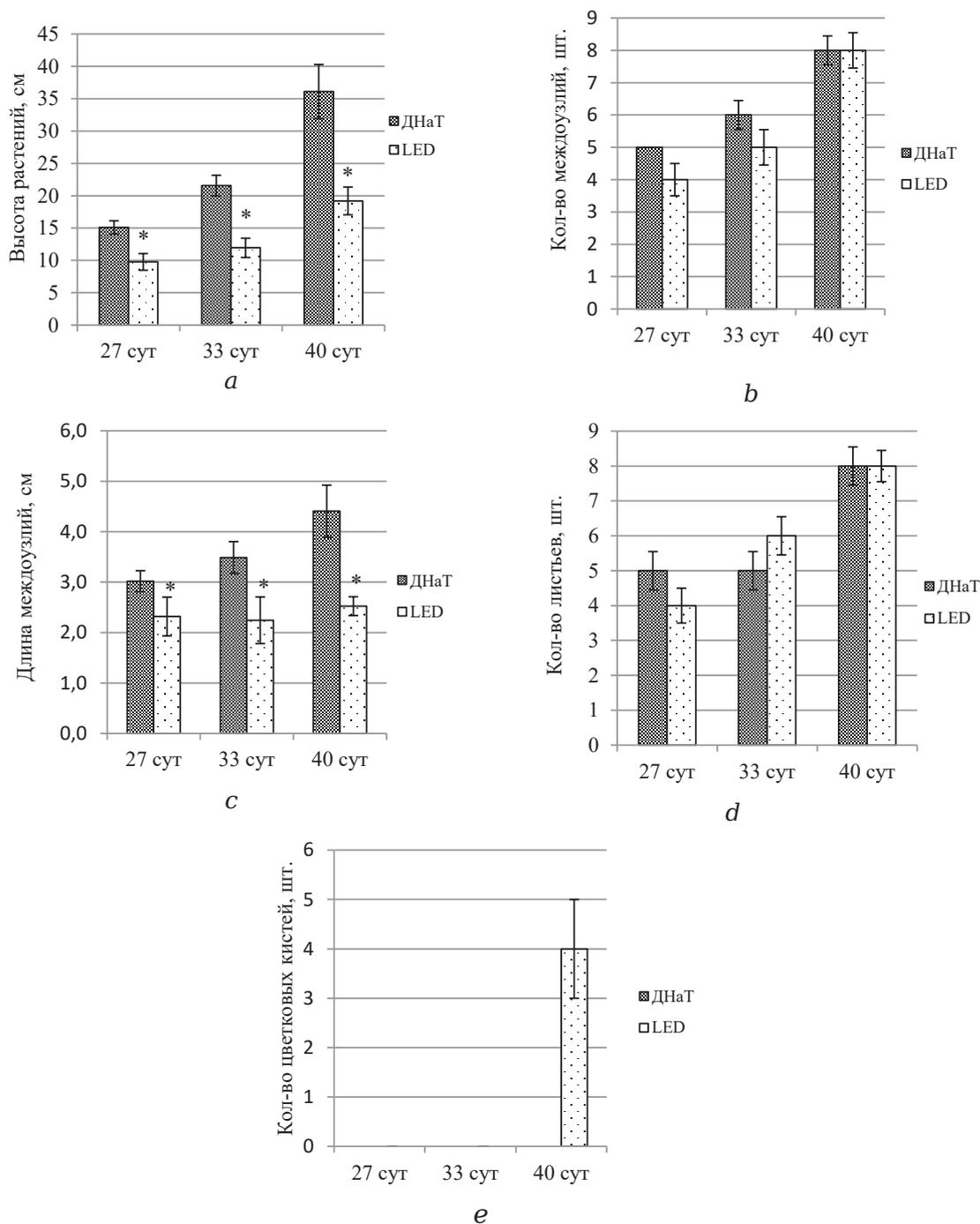


Рис. 4. Высота (a) и длина (b) растений, количество междоузлий (c), количество листьев (d) и цветковых кистей (e) растений томата *Lucopersicon esculentum* Mill. при ДНаТ- и LED-освещении. * – различия достоверны по сравнению с контрольным ДНаТ-вариантом при $p \leq 0,05$

Fig. 4. Plant height (a), length (b) and number of internodes (c), number of leaves (d) and flowers (e) of tomato plants *Lucopersicon esculentum* Mill. at HPS and LED lighting. * – differences are significant compared with the control HPS-variant at $p \leq 0.05$

ностью. Таким образом, темпы роста и развития ювенильных растений (рассады) томата в условиях опытно-производственного участка при LED-освещении являются гораздо более высокими, чем под лампами ДНаТ. Правильно подобранный спектральный состав светодиодного освещения позволяет регулировать и оптимизировать процессы фотосинтеза и фотоморфогенеза, обеспечивая успешное внедрение инновационных ресурсосберегающих технологий в растениеводство.

Заключение. Показано преимущество использования LED-освещения для культивирования рассады высокостебельных сортов томата в условиях производства по сравнению с лампами ДНаТ, обусловленное прежде всего разработкой спектра, обеспечивающего оптимизацию фотосинтеза, фотоморфогенеза и ускоряющего процессы роста и развития. Так, растения, выращиваемые в условиях опытного участка на КУП «Минская овощная фабрика», оснащенного LED-облучателями, по большинству физиологических параметров (сухая масса и содержание сухого вещества вегетативных органов, содержание фотосинтетических пигментов, функциональная активность работы фотосинтетического аппарата, количество цветковых кистей и сроки их образования) превосходили растения, культивируемые при традиционном освещении лампами ДНаТ. Предполагается, что более интенсивные процессы роста и развития, повышенная фотосинтетическая и биосинтетическая активность обеспечили рассаде, выращенной при LED-освещении, более высокий адаптивный потенциал и приживаемость при пересадке, повышение урожайности, особенно за счет более раннего плодоношения.

Благодарности. Работа выполнена в рамках проекта «Осуществить сравнительный мониторинг физиолого-биохимических процессов и продуктивности растений томата и культур для салатных линий при экспериментальной светодиодной и традиционной досветках в условиях опытно-производственного участка, разработать временные регламенты досветки томата и зеленых культур» (2016–2018 гг.), финансируемого из инновационного фонда Мингорисполкома.

Авторы выражают благодарность Мингорисполкому и КУП «Минская овощная фабрика» за содействие в проведении исследований.

Acknowledgements. The work was carried out within the framework of the project “To carry out a comparative monitoring of physiological and biochemical processes and productivity of tomato plants and crops for lettuce lines under experimental LED and traditional lighting in the conditions of a pilot production site, to develop temporary regulations for the lighting of tomato and green crops” (2016–2018) and financed by the innovation fund of the Minsk City Executive Committee.

The authors would like to express their gratitude to the Minsk City Executive Committee and the Municipal Unitary Enterprise “Minsk Vegetable Factory” for assistance in conducting research.

Список использованных источников

1. Plasticity of photosynthetic processes and the accumulation of secondary metabolites in plants in response to monochromatic light environments: A review / M. Landi [et al.] // *Biochim. Biophys. Acta Bioenerg.* – 2020. – Vol. 1861, N 2. – Art. 148131. <https://doi.org/10.1016/j.bbabi.2019.148131>
2. Закурин, А. О. Светокультура растениеводства защищенного грунта: фотосинтез, фотоморфогенез и перспективы применения светодиодов / А. О. Закурин, А. В. Щенникова, А. М. Каминская // *Физиология растений.* – 2020. – Т. 67, № 3. – С. 246–258.
3. Тихомиров, А. А. Светокультура растений: биофизические и биотехнологические основы : учеб. пособие для студентов высш. учеб. заведений / А. А. Тихомиров, В. П. Шарупич, Г. М. Лисовский. – Новосибирск : Изд-во Сибир. отд-ния РАН, 2000. – 213 с.
4. Сытников, В. Современные системы освещения / В. Сытников // *Мир теплиц.* – 2013. – № 6. – С. 24–25.
5. Light Emitting Diodes (LEDs) as agricultural lighting: impact and its potential on improving physiology, flowering, and secondary metabolites of crops / M. al Murad [et al.] // *Sustainability.* – 2021. – Vol. 13, N 4. – Art. 1985. <https://doi.org/10.3390/su13041985>
6. Horticultural lighting system optimization: A review / L. Sipos [et al.] // *Scientia Horticulturae.* – 2020. – Vol. 273. – Art. 109631. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109631>
7. Production of tomato by countries. Food and Agriculture Organization. 2012 [Electronic resource]. – Mode of access: <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>. – Date of access: 19.09.2022.
8. Enrichment of tomato paste with 6 % tomato peel increases lycopene and β -carotene bioavailability in men / E. Reboul [et al.] // *J. Nutr.* – 2005. – Vol. 135, N 4. – P. 790–794. <https://doi.org/10.1093/jn/135.4.790>
9. Philips Lumileds 2008. Light by LUXEON Newsletter [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.lumileds.com/newsletter/>. – Date of access: 19.09.2022.
10. Gunnlaugsson, B. Interlight and plant density in year-round production of tomato at northern latitudes / B. Gunnlaugsson, S. Adalsteinsson // *Acta Horticulturae.* – 2006. – Vol. 711. – P. 71–76. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2006.711.6>
11. The effect of LED lighting on the growth of seedlings of hybrid tomato / M. N. M. Al-Rukabi [et al.] // *Fourth International conference for agricultural and sustainability sciences, October 4–5, 2021, Babil, Iraq (IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 910).* Art. 012127. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/910/1/012127>
12. Son, K.-H. Growth and development of cherry tomato seedlings grown under various combined ratios of red to blue LED lights and fruit yield and quality after transplanting / Ki-Ho Son, Eun-Young Kim, Myung-Min Oh // *Protect. Hortic. Plant Factory.* – 2018. – Vol. 27, N 1. – P. 54–63. <https://doi.org/10.12791/KSBEC.2018.27.1.54>

13. Wettstein, D. Formula of chlorophyll determination / D. Wettstein // Exp. Cell Res. – 1957. – Vol. 12, N 3. – P. 427–489.

14. Терминология количественных характеристик при изучении роста, продуктивности и фотосинтеза сельскохозяйственных растений : метод. указания / сост. : М. И. Зеленский, О. Д. Быков. – Ленинград : НИИ растениеводства им. Н. И. Вавилова, 1982. – 45 с.

15. Новые возможности в оценке состояния растений / Н. Г. Акиншина [и др.] // Сибир. экол. журн. – 2008. – Т. 15, № 2. – С. 249–254.

References

1. Landi M., Zivcak M., Sytar O., Brestic M., Allakhverdiev S. I. Plasticity of photosynthetic processes and the accumulation of secondary metabolites in plants in response to monochromatic light environments: A review. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – Bioenergetics*, 2020, vol. 1861, no. 2, art. 148131. <https://doi.org/10.1016/j.bbatio.2019.148131>

2. Zakurin A. O., Shchennikova A. V., Kamionskaya A. M. Artificial-Light Culture in Protected Ground Plant Growing: Photosynthesis, Photomorphogenesis, and Prospects of LED Application. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2020, vol. 67, no. 3, pp. 413–424. <https://doi.org/10.1134/S102144372003022X>

3. Tikhomirov A. A., Sharupich V. P., Lisovskii G. M. Light culture of plants: biophysical and biotechnological foundations. Novosibirsk, Publishing house of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2000. 213 p. (in Russian).

4. Sytnikov V. Modern lighting systems. *Mir teplits [World of greenhouses]*, 2013, no. 6, pp. 24–25 (in Russian).

5. Al Murad M., Razi K., Jeong B. R., Samy P. M. A., Muneer S. Light Emitting Diodes (LEDs) as agricultural lighting: impact and its potential on improving physiology, flowering, and secondary metabolites of crops. *Sustainability*, 2021, vol. 13, no. 4, art. 1985. <https://doi.org/10.3390/su13041985>

6. Sipos L., Boros I. F., Csambalik L., Szjkelyd G., Junge A., Balazs L. Horticultural lighting system optimization. *Scientia Horticulturae*, 2020, vol. 273, art. 109631. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109631>

7. Production of Tomato by countries. Food and Agriculture Organization. 2012. Available at: <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx> (accessed 19.09.2022).

8. Reboul E., Borel P., Mikail C., Abou L., Charbonnier M., Caris-Veyrat C., Goupy P., Portugal H., Lairon D., Amiot M. Enrichment of tomato paste with 6 % tomato peel increases lycopene and β -carotene bioavailability in men. *Journal of Nutrition*, vol. 135, no. 4, pp. 790–794. <https://doi.org/10.1093/jn/135.4.790>

9. Philips Lumileds 2008. Light by LUXEON Newsletter. Available at: <http://www.lumileds.com/newsletter/> (accessed 19.09.2022).

10. Gunnlaugsson B., Adalsteinsson S. Interlight and plant density in year-round production of tomato at northern latitudes. *Acta Horticulturae*, 2006, vol. 711, pp. 71–76. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2006.711.6>

11. Al-Rukabi M. N. M., Leunov V. I., Tarakanov I. G., Tereshonkova T. A. The effect of LED lighting on the growth of seedlings of hybrid tomato. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Volume 910, Fourth International conference for agricultural and sustainability sciences, October 4–5, 2021, Babil, Iraq. Art. 012127. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/910/1/012127>

12. Son K.-H., Kim E.-Y., Oh M.-M. Growth and development of cherry tomato seedlings grown under various combined ratios of red to blue LED lights and fruit yield and quality after transplanting. *Protected Horticulture and Plant Factory*, 2018, vol. 27, no. 1, pp. 54–63. <https://doi.org/10.12791/KSBEC.2018.27.1.54>

13. Wettstein D. Formula of chlorophyll determination. *Experimental Cell Research*, 1957, vol. 12, no. 3, pp. 427–489.

14. Zelenskii M. I., Bykov O. D. Terminology of quantitative characteristics in the study of growth, productivity and photosynthesis of agricultural plants. *Leningrad, All-Russian Research Institute of Plant Growing named after. N. I. Vavilova*, 1982. 45 p. (in Russian).

15. Akinshina N. G., Azizov A. A., Karaseva T. A., Kloze E. New opportunities in assessing the condition of plants. *Sibirskii ekologicheskii zhurnal [Siberian ecological journal]*, 2008, vol. 15, no. 2, pp. 249–254 (in Russian).

Информация об авторах

Молчан Ольга Викторовна – канд. биол. наук, доцент, заведующий лабораторией. Институт экспериментальной ботаники им. В. Ф. Купревича НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: olga_molchan@mail.ru

Обуховская Людмила Владимировна – 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: olv_8@mail.ru

Куделина Татьяна Николаевна – науч. сотрудник. Институт экспериментальной ботаники им. В. Ф. Купревича НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: 10tan10@mail.ru

Information about the authors

Olga V. Molchan – Ph. D. (Biol.), Associate Professor, 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: olga_molchan@mail.ru

Lyudmila V. Obukhovskaya – 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: olv_8@mail.ru

Tatiana N. Kudelina – 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: 10tan10@mail.ru

Астасенко Николай Игнатьевич – науч. сотрудник. Республиканское научно-производственное унитарное предприятие «Центр светодиодных и оптоэлектронных технологий НАН Беларуси» (Логойский тракт, 20, 220090, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: info@ledcenter.by

Баркун Михаил Иосифович – вед. инженер. Республиканское научно-производственное унитарное предприятие «Центр светодиодных и оптоэлектронных технологий НАН Беларуси» (Логойский тракт, 20, 220090, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: m_barkun@ledcenter.by

Трофимов Юрий Васильевич – канд. техн. наук, директор. Республиканское научно-производственное унитарное предприятие «Центр светодиодных и оптоэлектронных технологий НАН Беларуси» (Логойский тракт, 20, 220090, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: trofimo119@gmail.com

Nikolay I. Astasenko – Researcher. Republican Scientific and Production Unitary Enterprise “Center of LED and Optoelectronic Technologies of National Academy of Sciences of Belarus” (20, Logoiski Tract, 220090, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: info@ledcenter.by

Mikhail I. Barkun – Lead Engineer. Republican Scientific and Production Unitary Enterprise “Center of LED and Optoelectronic Technologies of National Academy of Sciences of Belarus” (20, Logoiski Tract, 220090, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: m_barkun@ledcenter.by

Yuri V. Trofimov – Ph. D. (Tech.), director. Republican Scientific and Production Unitary Enterprise “Center of LED and Optoelectronic Technologies of National Academy of Sciences of Belarus” (20, Logoiski Tract, 220090, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: trofimo119@gmail.com

ISSN 1029-8940 (Print)
ISSN 2524-230X (Online)
УДК 592:502.4(476)
<https://doi.org/10.29235/1029-8940-2023-68-4-293-302>

Поступила в редакцию 24.01.2023
Received 24.01.2023

М. Д. Мороз, В. В. Вежновец

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

МАКРОЗООБЕНТОС РЕКИ НЕМАН В ГРАНИЦАХ ГРОДНЕНСКОЙ ОБЛАСТИ

Аннотация. Изучены видовой состав и численность макрозообентоса р. Неман в границах Гродненской области. Всего выявлено 165 низших определяемых таксонов (НОТ) – представителей макрозообентоса, относящихся к трем типам водных беспозвоночных животных: Mollusca – 30 НОТ, Annelida – 12, Arthropoda – 123 НОТ. До вида было идентифицировано 119 таксономических элементов. В изученных створах р. Неман среднее количество выявленных НОТ составило 20,75 экз., средняя численность представителей макрозообентоса – 857,5 экз. Среди коллектированных водных беспозвоночных животных выявлены инвазивные виды – *Lithoglyphus naticoides* (Pfeiffer, 1828), *Dreissena polymorpha* (Pallas, 1771) и *Orconectes limosus* (Rafinesque, 1817). Редким видом, найденным в Беларуси только в третий раз, является поденка *Ametropus fragilis* Albarda, 1878. Охраняемыми в Беларуси и ряде стран Западной Европы являлись стрекозы *Anax imperator* Leach, 1815 и *Gomphus flavipes* Charpentier, 1825.

Ключевые слова: зообентос; охраняемые, аборигенные и чужеродные виды; река Неман

Для цитирования: Мороз, М. Д. Макрозообентос реки Неман в границах Гродненской области / М. Д. Мороз, В. В. Вежновец // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. біял. навук. – 2023. – Т. 68, № 4. – С. 293–302. <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2023-68-4-293-302>

Michael D. Moroz, Vasil V. Vezhnovets

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

MACROZOOBENTHOS OF THE NEMAN RIVER WITHIN THE BORDERS OF THE GRODNO REGION

Abstract. The species composition and abundance of macrozoobenthos of the Neman River within the borders of the Grodno region have been studied. A total of 165 identified lower detectable taxa (NOTES) of macrozoobenthos representatives belonging to 3 types of aquatic invertebrates were found: Mollusca – 30, Annelida – 12, and Arthropoda – 123 NOTES. Prior to the species, 119 taxonomic elements were detected. The average number of identified lower detectable taxa in the studied Neman River beds was 20.75 NOTES. The average number of macrozoobenthos representatives in the studied sections of the Neman River reached 857.5 specimens. Among the collected aquatic invertebrates, invasive species were identified – *Lithoglyphus naticoides* (Pfeiffer, 1828), *Dreissena polymorpha* (Pallas, 1771) and *Orconectes limosus* (Rafinesque, 1817). A rare species found in Belarus only for the third time is the mayfly *Ametropus fragilis* Albarda, 1878. Dragonflies *Anax imperator* Leach, 1815 and *Gomphus flavipes* Charpentier, 1825 were protected in Belarus and in a number of Western European countries.

Keywords: zoobenthos; protected, native and alien species; Neman River

For citation: Moroz M. D., Vezhnovets V. V. Macrozoobenthos of the Neman River within the borders of the Grodno region. *Vesti Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya biyalagichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological series*, 2023, vol. 68, no. 4, pp. 293–302 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2023-68-4-293-302>

Введение. Представители водных беспозвоночных животных, входящие в сообщество макрозообентоса, являются важными элементами гидрофауны разнообразных текущих и стоячих континентальных водоемов. Эти гидробионты входят в рацион многих видов рыб и других представителей позвоночных животных, связанных с водной средой. Отдельные таксономические группы макрозообентоса часто используются для биоиндикации качества текущих вод.

Являясь трансграничным водотоком, р. Неман способна играть важную роль в процессе переноса биологических объектов как нативного происхождения, так и чужеродных элементов. По этой причине Неман включен в состав центрального европейского инвазивного коридора.

Неман протекает по территории Беларуси, Литвы и Калининградской области России, имеет длину 937 км (в границах Беларуси 459 км), площадь водозабора 98,2 тыс. км², в том числе на территории Беларуси 35 тыс. км² (без водозабора р. Виляя). Среднегодовой расход воды при выходе за границы Беларуси – 214 м³/с, в устье – 685 м³/с. Общее падение реки на территории Беларуси 96,5 м. Средний наклон водной поверхности 0,21 %. Неман – третья по величине река

в Беларуси и 14-я в Европе. Неман имеет около 180 притоков. В 2012 г. около г. Гродно введена в строй Гродненская ГЭС. Огинский канал соединяет Днепр и Августовский канал с Вислой [1, 2].

Однако необходимо признать, что базовых данных о видовом составе и численности аборигенных и инвазивных представителей макрозообентоса, обитающих в р. Неман, особенно в нижней части ее течения, все еще недостаточно.

Целью настоящих исследований являлось выявление таксономической структуры сообщества макрозообентоса, определение видового состава, выявление чужеродных, редких и охраняемых видов в р. Неман в границах Гродненской области.

Материалы и методика исследований. Сборы и наблюдения, послужившие материалом для данного сообщения, были проведены в сентябре 2021 г. и в июле, сентябре 2022 г.

Взятие проб осуществляли при помощи стандартного гидробиологического сачка (25×25 см, 500 μm) методом траления в прибрежной части водотока на глубине до 1,0 м. Также на каменистых грунтах и в местах развития макрофитов производили выемку погруженных предметов (камней, коряг и т. д.) с последующим осмотром и сбором выявленных водных беспозвоночных. В дальнейшем материал фиксировали 70 %-ным раствором этилового спирта. Разбор и видовую идентификацию животных проводили в лабораторных условиях.

При описании таксономического богатства макрозообентоса использовали термин НОТ – низший определяемый таксон [3].

Были исследованы 8 створов на р. Неман в границах Гродненской области: 1 – р. Неман, н. п. Гожа (Гродненский р-н), координаты: 53.8502, 23.8392; 2 – р. Неман, н. п. Зарица (Гродненский р-н), координаты: 53.761538, 23.810586; 3 – р. Неман, н. п. Береговой (Гродненский р-н), координаты: 53.639574, 23.982202; 4 – р. Неман, н. п. Жиличи (Гродненский р-н), координаты: 53.639574, 23.982202; 5 – р. Неман, н. п. Подбораны, в верхней части водохранилища Гродненской ГЭС (Гродненский р-н), координаты: 53.472343, 24.240322; 6 – р. Неман, н. п. Подбораны, затока в водохранилище Гродненской ГЭС (Гродненский р-н), координаты: 53.471370, 24.240176; 7 – р. Неман, н. п. Селец (Лидский р-н), координаты: 53.671495, 25.443263; 8 – р. Неман, н. п. Збойск (Ивьевский р-н), координаты: 53.865081, 25.746204.

За время исследований было собрано и идентифицировано 6860 экз. представителей макрозообентоса, находящихся на личиночной и имагинальной стадиях развития.

Результаты и их обсуждение. Исследования позволили определить 165 НОТ – представителей макрозообентоса, относящихся к трем типам водных беспозвоночных животных: Mollusca – 30, Annelida – 12, Arthropoda – 123.

До вида было идентифицировано 119 представителей сообщества макрозообентоса (см. таблицу).

Наименьшее значение показателя количества выявленных НОТ зарегистрировано в р. Неман в створе в окрестностях (окр.) н. п. Жиличи – 38 (22,89 % от всех идентифицированных НОТ). Наибольшая величина этого показателя были отмечена в окр. н. п. Селец – 85 (51,21 % НОТ).

Среднее количество выявленных НОТ в изученных створах р. Неман составило 20,75 экз.

Наибольшая численность представителей макрозообентоса отмечалась в р. Неман в окр. н. п. Селец (Лидский р-н) – 1190 экз., что составляло 17,35 % от всех коллектированных водных беспозвоночных, наименьшая – для створа в окр. н. п. Жиличи – 422 экз. (6,15 %).

Средняя численность представителей макрозообентоса в изученных створах р. Неман составила 857,5 экз.

Среди коллектированных водных беспозвоночных животных выявлены чужеродные, редкие и охраняемые в Беларуси и Европе виды.

К инвазивным видам относятся моллюски *Lithoglyphus naticoides* (Pfeiffer, 1828), *Dreissena polymorpha* (Pallas, 1771) и десятиногий рак *Orconectes limosus* (Rafinesque, 1817).

Lithoglyphus naticoides (Pfeiffer, 1828) является понто-каспийским видом, современное распространение которого включает территории от рек Рейн и Дунай на западе и от Западной Двины и Днепра на востоке [4]. На территории современной Беларуси вид впервые обнаружен в р. Припять [5]. *Материал:* р. Неман, н. п. Збойск (Ивьевский р-н), 09.09.2021 – 2 экз.; 06.07.2022 – 2 экз.

Таксономическая структура и распределение представителей макрозообентоса, обитающих в р. Неман (Гродненская обл.)

Taxonomic structure and distribution of macrozoobentos representatives living in the Neman River (Grodno region)

№ п/п	Таксон, вид	Кол-во экземпляров в створах								Итого
		1	2	3	4	5	6	7	8	
	Тип MOLLUSCA									
	Класс Gastropoda									
	Отр. Neritopsina									
	Сем. Neritidae									
1	<i>Theodoxus fluviatilis</i> (Linnaeus, 1758)	1				15		15	28	59
	Отр. Architaenioglossa									
	Сем. Viviparidae									
2	<i>Viviparus viviparus</i> (Linnaeus, 1758)	78	2	29		272	87	259	228	955
	Отр. Neotaenioglossa									
	Сем. Bithyniidae									
3	<i>Bithynia tentaculata</i> (Linnaeus, 1758)	8	6	19		8	11	24	64	140
	Сем. Hydrobiidae									
4	<i>Lithoglyphus naticoides</i> (Pfeiffer, 1828)								4	4
	Отр. Ectobranchia									
	Сем. Valvatidae									
5	<i>Valvata cristata</i> (O. F. Müller, 1774)			5						5
6	<i>Valvata piscinalis</i> (O. F. Müller, 1774)			2	2	2		1		7
	Отр. Pulmonata									
	Сем. Acroloxidae									
7	<i>Acroloxus lacustris</i> (Linnaeus, 1758)	3		2			5	2	2	14
	Сем. Physidae									
8	<i>Physa fontinalis</i> (Linnaeus, 1761)	17		2				7	4	30
	Сем. Lymnaeidae									
9	<i>Galba truncatula</i> (O. F. Müller, 1774)		1				2			3
10	<i>Lymnaea stagnalis</i> (Linnaeus, 1758)	4	11	9	6	3	5	8	24	70
11	<i>Marstoniopsis scholtzi</i> (A. Schmidt, 1856)			2						2
12	<i>Radix auricularia</i> (Linnaeus, 1758)	1		2		1		2	2	8
13	<i>Radix balthica</i> (Linnaeus, 1758)	11	16	35	12	12	3	4	9	102
14	<i>Radix sp.</i>	2		3		3			1	9
15	<i>Stagnicola palustris</i> (O. F. Müller, 1774)							1		1
16	<i>Lymnaeidae sp.</i>		2					12	23	37
	Сем. Planorbidae									
17	<i>Anisus vortex</i> (Linnaeus, 1758)			7						7
18	<i>Bathymphalus contortus</i> (Linnaeus, 1758)			1						1
19	<i>Gyraulus albus</i> (O. F. Müller, 1774)	13		19						32
20	<i>Gyraulus crista</i> (Linnaeus, 1758)			2						2
21	<i>Planorbarius corneus</i> (Linnaeus, 1758)	2	2	5	2		2			13
22	<i>Planorbis corneus</i> O. F. Müller, 1774		1				1			2
23	<i>Planorbis planorbis</i> (Linnaeus, 1758)			3			2	4		9
24	<i>Segmentina nitida</i> (O. F. Müller, 1774)	1	1	12	2		3			19
	Класс Bivalvia									
	Отр. Veneroidea									
	Сем. Sphaeriidae									
25	<i>Sphaerium corneum</i> (Linnaeus 1758)								2	2
26	<i>Sphaerium rivicola</i> (Lamarck, 1818)							1		1
27	<i>Sphaerium sp.</i>			3	1	3		8	1	16
28	<i>Pisidium sp.</i>	1		2						3
	Отр. Unionoida									
	Сем. Unionidae									
29	<i>Unio tumidus</i> (Linnaeus, 1758)		1						1	2
	Сем. Dreissenidae									
30	<i>Dreissena polymorpha</i> (Pallas, 1771)	1	2	4	1					8

Продолжение таблицы

№ п/п	Таксон, вид	Кол-во экземпляров в створах								Итого
		1	2	3	4	5	6	7	8	
Тип ANNELIDA Класс Oligochaeta Отр. Nilotaxida Сем. Tubificidae										
1	<i>Stylaria lacustris</i> (Linnaeus, 1767)	6	168	6	9	17		11	2	219
2	<i>Oligochaeta gen. spp.</i>	16	98	12	3	7	3	15	14	168
Класс Hirudinea Отр. Rhynchobdellida Сем. Glossiphoniidae										
3	<i>Helobdella stagnalis</i> (Linnaeus, 1758)	5	20	2			2			29
4	<i>Hemiclepsis marginata</i> (O.F. Müller, 1774)	1	1	1		3		3		9
5	<i>Glossiphonia complanata</i> (Linnaeus, 1758)					1				1
6	<i>Glossiphonia heteroclita</i> (Linnaeus, 1761)		15	4	1			1	2	23
7	<i>Placobdella costata</i> (Fr. Müller, 1846)	2								2
8	<i>Theromyzon tessulatum</i> (O. F. Müller, 1774)			4	4					8
Сем. Piscicolidae										
9	<i>Piscicola geometra</i> (Linnaeus, 1761)		1	1		5		1		8
Отр. Arhynchobdellida Сем. Erpobdellidae										
10	<i>Erpobdella nigricollis</i> (Brandes, 1900)	6	2				6			14
11	<i>Erpobdella octoculata</i> (Linnaeus, 1758)	9	2	1	1	3	2	10	4	32
12	<i>Erpobdella sp.</i>	3	1	3			3	3		13
Тип ARTHROPODA Класс Arachnidae Отр. Trombidiformes										
1	<i>Hydracarina gen. sp.</i>			15	3	2	11			31
Отр. Araneae Сем. Cybaeidae										
2	<i>Argyroneta aquatica</i> (Clerck, 1758)						4	3		7
Сем. Lycosoidea										
3	<i>Dolomedes fimbriatus</i> (Clerck, 1757)					1			2	3
4	<i>Dolomedes sp.</i>							1		1
5	<i>Pardosa sp.</i>					1	2			3
6	<i>Pirata sp.</i>					2				2
Сем. Tetragnathidae										
7	<i>Pachygnatha clercki</i> Sundevall, 1823	1				2				3
8	<i>Tetragnatha extensa</i> (Linnaeus, 1758)	2		4	4	2			2	14
9	<i>Arachnidae gen. spp.</i>			3	3					6
Класс Malacostraca Отр. Isopoda Сем. Asellidae										
10	<i>Asellus aquaticus</i> (Linnaeus, 1758)	56	13	5		23	21	49	21	188
Отр. Amphipoda Сем. Gammaridae										
11	<i>Gammarus varsoviensis</i> Jazdzewski, 1975	33	5	2	4	9		34	44	131
12	<i>Synurella ambulans</i> (Müller, 1846)							1		1
Отр. Decapoda Сем. Cambaridae										
13	<i>Orconectes limosus</i> (Rafinesque, 1817)			7		5	3	1		16
Сем. Argulidae										
14	<i>Argulus foliaceus</i> (Linnaeus, 1758)			1						1
Отр. Collembola Сем. Poduridae										
15	<i>Podura aquatica</i> (Linnaeus, 1758)		5	3	2		3	39	1	53

Продолжение таблицы

№ п/п	Таксон, вид	Кол-во экземпляров в створах								Итого
		1	2	3	4	5	6	7	8	
Сем. Isotomidae										
16	<i>Isotoma viridis</i> Bourlet, 1839		1			7			11	19
Отр. Sminthuridae										
17	<i>Sminthurides aquaticus</i> (Bourlet, 1843)		1					1		2
Отр. Entomobryidae										
18	<i>Lepidocyrtus curvicolis</i> Bourlet, 1839							1		1
Отр. Plecoptera										
Сем. Nemouridae										
19	<i>Nemoura cinerea</i> (Retzius, 1783)								1	1
Отр. Ephemeroptera										
Сем. Baetidae										
20	<i>Cloeon simile</i> Eaton, 1870	161	43	233	239	192	368	528	80	1844
21	<i>Centroptilum luteolum</i> (Müller, 1776)		6	1				3	12	22
22	<i>Procloeon bifidum</i> Bengtsson, 1912		1						15	16
23	<i>Baetis fuscatus</i> (Linnaeus, 1761)	32	31			2				65
24	<i>Baetis rhodani</i> (Pictet, 1845)		1							1
25	<i>Baetis vernus</i> Curtis, 1834	92						23	59	174
26	<i>Baetis</i> sp.						2	17	13	32
Сем. Ametropodidae										
27	<i>Ametropus fragilis</i> Albarda, 1878								1	1
Сем. Potamanthidae										
28	<i>Potamanthus luteus</i> (Linnaeus, 1767)	6	2							8
Сем. Heptageniidae										
29	<i>Heptagenia flava</i> Rostock, 1878	2						34	96	132
30	<i>Heptagenia</i> sp.			1	2	15	7	35	62	122
Сем. Ephemerellidae										
31	<i>Ephemerella ignita</i> (Poda, 1761)							1	3	4
Сем. Caenidae										
32	<i>Caenis macrura</i> Stephens, 1835							9		9
33	<i>Caenis robusta</i> Eaton, 1884			26	7		1	2		36
34	<i>Caenis</i> sp.			6		2	9		4	21
Отр. Trichoptera										
Сем. Ecnomidae										
35	<i>Ecnomus tenellus</i> (Rambur, 1842)				22					22
Сем. Polycentropodidae										
36	<i>Holocentropus picicornis</i> (Stephens, 1836)						1			1
37	<i>Neureclipsis bimaculata</i> (Linnaeus, 1761)	1							6	7
38	<i>Polycentropus irroratus</i> (Curtis, 1834)				8					8
Сем. Hydropsychidae										
39	<i>Hydropsyche pellucidula</i> (Curtis, 1834)							2		2
Сем. Limnephilidae										
40	<i>Anabolia</i> sp.							9	8	17
41	<i>Limnephilus flavicornis</i> (Fabricius, 1787)				3		2	36	5	46
42	<i>Limnephilus rhombicus</i> (Linnaeus, 1758)			1		3		1		5
43	<i>Limnephilus stigma</i> Curtis, 1834						1			1
44	<i>Limnephilus</i> sp.								3	3
Сем. Brachycentridae										
45	<i>Brachycentrus subnubilus</i> Curtis, 1834						2			2
46	<i>Brachycentrus</i> sp.								1	1
Сем. Hydroptilidae										
47	<i>Agraylea multipunctata</i> Curtis, 1834	1								1
48	<i>Hydroptila</i> sp.	1						1	2	4
49	<i>Ithytrichia lamellaris</i> Eaton, 1873							1		1
50	<i>Orthotrichia</i> sp.	2		1				3		6
51	<i>Oxyethira</i> sp.							1		1

Продолжение таблицы

№ п/п	Таксон, вид	Кол-во экземпляров в створах								Итого
		1	2	3	4	5	6	7	8	
Сем. Leptoceridae										
52	<i>Athripsodes aterrimus</i> (Stephens, 1836)		1						1	2
53	<i>Leptocerus tineiformis</i> Curtis, 1834						1			1
54	<i>Mystacides azurea</i> (Linnaeus, 1761)							3		3
55	<i>Mystacides longicornis</i> (Linnaeus, 1758)							2		2
56	<i>Oecetis furva</i> (Rambur, 1842)							2	2	4
57	<i>Oecetis lacustris</i> (Pictet, 1834)	3								3
58	<i>Trienodes bicolor</i> (Curtis, 1834)						2			2
59	<i>Leptoceridae gen. spp.</i>	2								2
Отр. Odonata										
Сем. Calopterygidae										
60	<i>Calopteryx splendens</i> (Harris, 1782)		1			5	5	22	12	45
61	<i>Calopteryx virgo</i> Linnaeus, 1758	4				1		3	8	16
Сем. Coenagrionidae										
62	<i>Coenagrion hastulatum</i> Charpentier, 1825							1		1
63	<i>Coenagrion puella</i> Linnaeus, 1758	1		26				3	4	34
64	<i>Coenagrion pulchellum</i> (Vander Linden, 1825)	64			6	12	1	7		90
65	<i>Coenagrion sp.</i>	49		16	3			6		74
66	<i>Erythromma najas</i> (Hansemann, 1823)	2	1	9	1			6	1	20
67	<i>Coenagrionidae gen. spp.</i>	3	5			1	6	3	14	32
Сем. Platycnemididae										
68	<i>Platycnemis pennipes</i> (Pallas, 1771)	3	2	1	1	4		9	3	23
Сем. Lestidae										
69	<i>Sympetma fusca</i> (Vander Linden, 1825)						1			1
Сем. Gomphidae										
70	<i>Gomphus flavipes</i> Charpentier, 1825						1	1		2
Сем. Aeschnidae										
71	<i>Anax imperator</i> Leach, 1815				1					1
72	<i>Aeschna grandis</i> (Linnaeus, 1758)						1			1
73	<i>Aeschna sp.</i>					1			1	2
74	<i>Anaciaeschna isosceles</i> Müller, 1767							2		2
Сем. Corduliidae										
75	<i>Cordulia aenea</i> (Linnaeus, 1758)						1			1
Отр. Heteroptera										
Сем. Nepidae										
76	<i>Nepa cinerea</i> Linnaeus, 1758					2	1	4	9	16
77	<i>Ranatra linearis</i> (Linnaeus, 1758)					4		2		6
Сем. Notonectidae										
78	<i>Notonecta glauca</i> Linnaeus, 1758			1			3	2		6
79	<i>Notonecta sp.</i>		1	1		3	2	1		8
Сем. Pleidae										
80	<i>Plea minutissima</i> Leach, 1817	3	3	25	3		13	4	3	54
Сем. Naucoridae										
81	<i>Ilyocoris cimicoides</i> (Linnaeus, 1758)	3	13	32	2	4	11	2	5	72
Сем. Corixidae										
82	<i>Sigara striata</i> (Linnaeus, 1758)	1	5							6
83	<i>Sigara sp.</i>		4					1		5
84	<i>Corixidae gen. spp.</i>	1	6							7
Сем. Mesoveliidae										
85	<i>Mesovelia furcata</i> Mulsant et Rey, 1852				10				1	11
Сем. Gerridae										
86	<i>Aquarius paludum</i> (Fabricius, 1794)					4			2	6
87	<i>Gerris lacustris</i> (Linnaeus, 1758)	1								1
88	<i>Gerridae gen. spp.</i>	5	6			19		2	29	61

Окончание таблицы

№ п/п	Таксон, вид	Кол-во экземпляров в створах								Итого
		1	2	3	4	5	6	7	8	
Отр. Coleoptera Сем. Haliplidae										
89	<i>Haliplus fluviatilis</i> Aubé, 1836	8		5	1			2	6	22
90	<i>Haliplus</i> sp.	1			1			2	6	10
Сем. Noteridae										
91	<i>Noterus crassicornis</i> (Müller, 1776)					3				3
92	<i>Noterus</i> sp.		1							1
Сем. Dytiscidae										
93	<i>Porhydrus</i> sp.							1		1
94	<i>Laccophilus hyalinus</i> (De Geer, 1774)	8			2	6	1		1	18
95	<i>Platambus maculatus</i> (Linnaeus, 1758)				1				1	2
96	<i>Rhantus suturalis</i> (MacLeay, 1825)	1								1
97	<i>Dytiscidae</i> gen. spp.	32	3	3	2	5	9	16	34	104
Сем. Gyrinidae										
98	<i>Gyrinus aeratus</i> Stephens, 1835							1		1
99	<i>Gyrinus natator</i> (Linnaeus, 1758)								1	1
Сем. Hydrophilidae										
100	<i>Anacaena lutescens</i> (Stephens, 1829)							1	1	2
101	<i>Cercyon unipunctatus</i> (Linnaeus, 1758)		1							1
102	<i>Helochares obscurus</i> (O. F. Müller, 1776)						1			1
103	<i>Hydrobius</i> sp.		1							1
104	<i>Laccobius sinuatus</i> Motschulsky, 1849								1	1
105	<i>Laccobius</i> sp.		1							1
106	<i>Hydrophilidae</i> gen. spp.		1			1			1	3
Сем. Hydraenidae										
107	<i>Hydraena palustris</i> Erichson, 1837		1					6		7
108	<i>Hydraena riparia</i> Kugelann, 1794					1			5	6
109	<i>Limnebius aluta</i> (Bedel, 1881)							2		2
110	<i>Limnebius nitidus</i> (Marsham, 1802)							1		1
Сем. Scirtidae										
111	<i>Scirtidae</i> gen. spp.						8			8
Отр. Megaloptera Сем. Sialidae										
112	<i>Sialis</i> sp.			1			1			2
Отр. Diptera										
113	<i>Ceratopogonidae</i> gen. spp.		5					1	3	9
114	<i>Chironomidae</i> gen. spp.	114	116	104	46	85	26	91	141	723
115	<i>Culicidae</i> gen. spp.		1						3	4
116	<i>Dixidae</i> gen. spp.	1				6	1	4	18	30
117	<i>Limoniidae</i> gen. spp.	3				1	1	1		6
118	<i>Psychodidae</i> gen. spp.		4							4
119	<i>Rhagionidae</i> sp.			1						1
120	<i>Simuliidae</i> gen. spp.	25					1	14	3	43
121	<i>Stratiomyiidae</i> gen. spp.					1	8	1		10
122	<i>Tabanidae</i> gen. spp.		1							1
Отр. Lepidoptera Сем. Crambidae										
123	<i>Cataclysta lemnata</i> (Linnaeus, 1758)		1		1		2	11	3	18
Всего:										
экземпляров		919	648	736	422	792	682	1471	1190	6860
видов, таксонов		59	57	58	38	51	55	85	72	166

Примечание. Створы: 1 – р. Неман, н. п. Гожа; 2 – р. Неман, н. п. Зарица; 3 – р. Неман, н. п. Береговой; 4 – р. Неман, н. п. Жиличи; 5 – р. Неман, н. п. Подбораны, в верхней части водохранилища Гродненской ГЭС; 6 – р. Неман, н. п. Подбораны, затока в верхней части водохранилища Гродненской ГЭС; 7 – р. Неман, н. п. Селец; 8 – р. Неман, н. п. Збойск.

Dreissena polymorpha (Pallas, 1771) также является понто-каспийским видом. В настоящее время ареал этого моллюска кроме практически всей Европы включает также Северную Америку [5]. Вид впервые отмечен для Беларуси в 1933 г. И. Ф. Овчинниковым [6]. *Материал*: 1 – р. Неман, н. п. Гожа, ниже порта (Гродненский р-н), 07.09.2021 – 1 экз.; 2 – р. Неман, н. п. Зарица (Гродненский р-н), 08.09.2021 – 2 экз.; 3 – р. Неман, н. п. Береговой (Гродненский р-н), 08.09.2021 – 2 экз.; 07.07.2022 – 2 экз.; 4 – р. Неман, н. п. Жиличи (Гродненский р-н), 08.07.2022 – 1 экз.

Orconectes limosus (Rafinesque, 1817). Первоначальной территорией обитания этого вида является восточное побережье Северной Америки [6]. Вид впервые отмечен в Беларуси на крайнем северо-западе в бассейне р. Неман и его притоках [7]. *Материал*: 1 – р. Неман, н. п. Береговой (Гродненский р-н), 08.09.2021 – 6 экз.; 07.07.2022 – 1 экз.; 2 – р. Неман, н. п. Подбораны, в верхней части водохранилища Гродненской ГЭС (Гродненский р-н), 21.09.2022 – 5 экз.; 3 – р. Неман, н. п. Подбораны, затока в водохранилище Гродненской ГЭС (Гродненский р-н), 07.07.2022 – 3 экз.; 4 – р. Неман, н. п. Селец (Лидский р-н), 21.09.2022 – 1 экз.

Редким видом, найденным в Беларуси только в третий раз, является поденка – *Ametropus fragilis* Albarda, 1878. Две личинки этого вида были ранее коллектированы в Беларуси в реках Неман и Западная Двина [8, 9]. Этот вид имеет транспалеарктический тип ареала, спорадически встречается в крупных реках Восточной Европы и Сибири [10, 11]. В Западной Европе известны единичные находки личинок этого вида в реках Рейн, Варта, Нарва, Дунай [12]. Вид включен в Приложение к Красной книге Беларуси (2015) как требующий дополнительного изучения и внимания в целях профилактической охраны (категория DD). Входит в Красный список Польши – категория охраны EN [13], Чехии – категория охраны CR [14], является угрожаемым видом в Австрии [15]. *Материал*: р. Неман, н. п. Збойск (Ивьевский р-н), 06.07.2022 – 1 личинка.

Охраняемыми в Беларуси и ряде стран Западной Европы являлись стрекозы *Anax imperator* Leach, 1815 и *Gomphus flavipes* Charpentier, 1825.

Anax imperator Leach, 1815 имеет IV категорию национального природоохранного статуса, охраняется в Европе (Приложение II Бернской конвенции). Категория: Least Concern (LC), ver. 3.1 (по данным IUCN Red List of Threatened Species версии 2013.2). Охраняется во всех сопредельных с Беларусью странах и в 31 субъекте Российской Федерации. Для вида характерен широкий ареал, пересекающий почти все природные зоны от Южной Африки до Южной Скандинавии на севере, Передней и Средней Азии [16]. Отмечается фрагментация ареала с тенденцией к усилению локализации местообитаний в направлении с юго-запада на северо-восток. В Беларуси личинки обитают в литоральной зоне больших озер и стоячих водоемов, реже – в проточных. Стрекозы могут улетать на большие расстояния (до 10 км) от места выхода имаго. *Материал*: р. Неман, н. п. Жиличи (Гродненский р-н), 21.09.2022 – 1 экз.

Gomphus flavipes Charpentier, 1825 включен в Приложение к Красной книге Беларуси (2015) как требующий дополнительного изучения и внимания в целях профилактической охраны (категория охраны DD). Этот вид также входит в Красный список Люксембурга – категория охраны CR. Охраняется в Великобритании с 1818 г. – категория охраны V. Вид включен в Красный список Латвии – категория охраны 1. Вид обитает в Европейской части бывшей СССР, на Кавказе, в Средней Азии, Южной Сибири, Дальнем Востоке России. Личинки живут в реках, глубоко зарываясь в ил или песок [17]. Предпочитают обитать в проточных водоемах на глинистом и глинисто-песчаном грунте, а также в пойменных водоемах, где даже могут переносить пересыхание. *Материал*: 1 – р. Неман, н. п. Подбораны (Гродненский р-н), затока в верхней части водохранилища Гродненской ГЭС, 07.07.2022 – 1 экз.; 2 – р. Неман, н. п. Селец (Лидский р-н), 08.09.2021 – 1 экз.

Заключение. Выявлено 165 НОТ – представителей макрозообентоса, относящихся к трем типам водных беспозвоночных животных: Mollusca – 30, Annelida – 12, Arthropoda – 123. До вида было идентифицировано 119 таксономических элементов. В изученных створах р. Неман среднее количество выявленных НОТ составило 20,75 экз., средняя численность представителей макрозообентоса – 857,5 экз. Среди коллектированных водных беспозвоночных животных обнаружены инвазивные виды – *Lithoglyphus naticoides* (Pfeiffer, 1828), *Dreissena polymorpha* (Pallas, 1771) и *Orconectes limosus* (Rafinesque, 1817). Редким видом, найденным в Беларуси только в третий

раз, является поденка *Ametropus fragilis* Albarda, 1878. Охраняемыми в Беларуси и ряде стран Западной Европы являются стрекозы *Anax imperator* Leach, 1815 и *Gomphus flavipes* Charpentier, 1825.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке БРФФИ, проект № В23МС-001.

Acknowledgements. The work was supported by the BRFFR, project No. В23MS-001.

Список использованных источников

1. Блакітная кніга Беларусі (Водныя аб'екты Беларусі) : энцыклапедыя / пад рэд. Н. А. Дзісько [і інш.]. – Мінск : Беларус. Энцыкл., 1994. – 415 с.
2. Природа Белоруссии : популяр. энцикл. / под ред. И. П. Шамякина. – Минск : БелСЭ, 1986. – 599 с.
3. Баканов, А. И. Использование характеристик разнообразия зообентоса для мониторинга состояния пресноводных экосистем / А. И. Баканов // Мониторинг биоразнообразия / под общ. ред. В. Е. Соколова, Ю. С. Решетникова, М. И. Шатуновского. – М., 1997. – С. 278–282.
4. Жадин, В. И. Моллюски пресных и солоноватых вод СССР / В. И. Жадин. – М. ; Л. : Изд-во АН СССР, 1952. – 376 с.
5. Лаенко, Т. М. Фауна водных моллюсков Беларуси / Т. М. Лаенко. – Минск : Беларус. навука, 2012. – 128 с.
6. Черная книга инвазивных видов животных Беларуси / сост. : А. В. Алехнович [и др.]; под общ. ред. В. П. Семенченко. – Минск : Беларус. навука, 2016. – 105 с.
7. The American spiny-cheek crayfish, *Orconectes limosus* in the fauna of Belarus / A. V. Alekhnovich [et al.] // Crayfish in Europe as alien species. How to make the best of a bad situation? / F. Gherardi, D. M. Holdich (eds). – Rotterdam, AA Balkema Publishers. Brookfield, 1999. – P. 237–242.
8. Левандовски, К. Новые для фауны Беларуси виды поденок (Insecta: Ephemeroptera) / К. Левандовски, М. Д. Мороз // Вест. НАН Беларусі. Сер. біял. навук. – 2001. – № 3. – С. 90–91.
9. Мороз, М. Д. Водные насекомые реки Западная Двина / М. Д. Мороз // Вестн. Витебск. гос. ун-та. – 2012. – № 6 (72). – С. 51–56.
10. Чернова, О. Я. Поденки (Ephemeroptera) / О. Я. Чернова // Жизнь пресных вод СССР / под ред. В. И. Жадина. – М. ; Л., 1940. – Т. 1. – С. 127–134.
11. Ключе, Н. Ю. Отряд поденки Ephemeroptera / Н. Ю. Ключе // Определитель пресноводных беспозвоночных России и сопредельных территорий / под ред. С. Я. Цалолыхина. – СПб., 1997. – Т. 3. – С. 176–220.
12. Fauna ČSSR. – Praha : Československá akademie věd, 1969. – Svazek 18 : Jepice – Ephemeroptera / V. Landa. – 349 p.
13. Kłonowska-Olejnik, M. Ephemeroptera Jętki / M. Kłonowska-Olejnik // Czerwona lista zwierząt ginących i zagrożonych w Polsce / red. Z. Głowaciński. – Kraków, 2002. – S. 128–132.
14. Soldan T. Ephemeroptera (jepice) / T. Soldan // Červený seznam ohrožených druhů České republiky. Bezobratlí / eds. J. Farač, D. Král, M. Škorpík. – Praha, 2005. – S. 122–124.
15. Bauernfeind, E. Die Eintagsfliegen Zentraleuropas (Insecta: Ephemeroptera) / E. Bauernfeind, U. H. Humpesch // Bestimmung und Ökologie. – Wien : Verlag des Naturhistorischen Museums, 2001. – 240 p.
16. Попова, А. Н. Отряд стрекозы Odonata / А. Н. Попова // Определитель пресноводных беспозвоночных Европейской части СССР / Г. Г. Винберг [и др.]; отв. ред. Л. А. Кутикова, Я. И. Старобогатов. – Л., 1977. – С. 266–288.
17. Попова, А. Н. Стрекозы (Odonata) / А. Н. Попова // Жизнь пресных вод СССР / под ред. В. И. Жадина. – М. ; Л., 1940. – Т. 1. – С. 111–126.

References

1. Dzis'ko N. A., Kurlovich M. M., Malashevich Ya. V., Zagardni V. G., Samuel' S. P., Sachanka B. I., Khauratovich I. P., Yakushka V. P. (eds.). *The Blue Book of Belarus (water project of Belarus)*. Minsk, Belaruskaya Entsiklopedyya Publ., 1994. 415 p. (in Belarusian).
2. Shamyakin I. P., Bulavko A. G., Garetskii R. G., Dis'ko N. A., Dolbik M. S., Dorofeev A. M. [et al.]. *Nature of Belarus: Popular Encyclopedia*. Minsk, Belorusskaya Sovetskaya Entsiklopediya Publ., 1986. 599 p. (in Russian).
3. Bakanov A. I. Using the characteristics of the diversity of zoobenthos for monitoring the state of freshwater. *Monitoring of biodiversity*. Moscow, 1997, pp. 278–282 (in Russian).
4. Zhadin V. I. *Mollusks of fresh and brackish waters of the USSR*. Moscow, Leningrad, Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1952. 376 p. (in Russian).
5. Laenko T. M. *Fauna of aquatic mollusks of Belarus*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2012. 128 p. (in Russian).
6. Alekhnovich A. V., Buga S. V., Drobenkov S. M., Zhorov D. G., Makarenko A. I., Petrov D. L. [et al.]. *The Black Book of invasive animal species of Belarus*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2016. 105 p. (in Russian).
7. Alekhnovich A. V., Ablon S. E., Kulesh V. F., Pareiko O. A. The American spiny-cheek crayfish, *Orconectes limosus* in the fauna of Belarus. *Crayfish in Europe as alien species. How to make the best of a bad situation?* Rotterdam, AA Balkema Publishers. Brookfield, 1999, pp. 237–242.
8. Levandowski K., Moroz M. D. Species of mayflies new to the fauna of Belarus (Insecta: Ephemeroptera). *Vesti Natsyyanal'nai Akademii navuk Belarusi. Seryya biyalagichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological series*, 2001, no. 3, pp. 90–91 (in Russian).

9. Moroz M. D. Aquatic insects of the Western Dvina River. *Vesnik Vitebskaga dzjarzhavnaga universiteta* [Bulletin of the Vitebsk State University], 2012, vol. 6 (72), pp. 51–56 (in Russian).
10. Chernova O. Ya. Mayflies (Ephemeroptera). *Life of fresh waters of the USSR. Vol. 1.* Moscow, Leningrad, 1940, pp. 127–134 (in Russian).
11. Klyuge N. Yu. Detachment of mayflies Ephemeroptera. *Key to freshwater invertebrates of Russia and adjacent lands.* St. Petersburg, 1997, vol. 3, pp. 176–220 (in Russian).
12. *Fauna ČSSR. Svazek 18. Landa V. Jepice – Ephemeroptera.* Praha, Československá akademie věd, 1969. 349 p.
13. Kłonowska-Olejnik M. Ephemeroptera Jętki. *Czerwona lista zwierząt ginących i zagrożonych w Polsce.* Krakow, 2002, s. 128–132.
14. Soldan T. Ephemeroptera (jepice). *Červený seznam ohrožených druhů České republiky. Bezobratlí.* Praha, 2005, pp. 122–124.
15. Bauernfeind E., Humpesch U. H. Die Eintagsfliegen Zentraleuropas (Insecta: Ephemeroptera). *Bestimmung und Ökologie.* Wien, Verlag des Naturhistorischen Museums, 2001. 240 p.
16. Popova A. N. Detachment of dragonflies Odonata. *Determinant of freshwater invertebrates of the European part of the USSR.* Leningrad, 1977, pp. 266–288 (in Russian).
17. Popova A. N. Dragonflies (Odonata). *Life of fresh waters of the USSR. Vol. 1.* Moscow, Leningrad, 1940, pp. 111–126 (in Russian).

Информация об авторах

Мороз Михаил Дмитриевич – канд. биол. наук, доцент, вед. науч. сотрудник. Научно-практический центр НАН Беларуси по биоресурсам (ул. Академическая, 27, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: mdmoroz@bk.ru

Вежновец Василий Васильевич – канд. биол. наук, доцент, вед. науч. сотрудник. Научно-практический центр НАН Беларуси по биоресурсам (ул. Академическая, 27, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: vezhn47@mail.ru

Information about the authors

Michael D. Moroz – Ph. D. (Biol.), Associate Professor, Leading Researcher. Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Bioresources (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: mdmoroz@bk.ru

Vasil V. Vezhnovets – Ph. D. (Biol.), Associate Professor, Leading Researcher. Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Bioresources (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vezhn47@mail.ru

ISSN 1029-8940 (Print)
ISSN 2524-230X (Online)
УДК 581.55:627.17
<https://doi.org/10.29235/1029-8940-2023-68-4-303-314>

Поступила в редакцию 10.11.2022
Received 10.11.2022

С. Э. Латышев, Л. М. Мерзвинский, Ю. И. Высоцкий, В. В. Латышева

Витебский государственный университет имени П. М. Машерова, Витебск, Республика Беларусь

РАСТИТЕЛЬНОСТЬ ПОРЯДКА *MAGNOCARICETALIA* В ОЗЕРАХ БЕЛОРУССКОГО ПООЗЕРЬЯ

Аннотация. Изучены сообщества растительности порядка *Magnocaricetalia* в 21 озере Белорусского Поозерья. В основе работы лежит анализ 60 описаний в соответствии с эколого-флористическим подходом Браун-Бланке. Установлена синтаксономическая структура порядка *Magnocaricetalia*, включающая 3 союза, 9 ассоциаций и 7 вариантов. Ценофлора порядка насчитывает 52 вида, самым богатым видовым составом характеризуется ассоциация *Caricetum gracilis*, в составе которой обнаружено 23 вида. Из 9 охарактеризованных сообществ в мезотрофных озерах встречается 8 ассоциаций, в эвтрофных – 5, в дистрофных – 4 ассоциации. Самой распространенной ассоциацией является *Equiseto fluviatilis-Caricetum rostratae*, выявленная в 13 озерах из 21. С учетом полученных результатов и литературных данных установлена синтаксономическая структура для Республики Беларусь порядка *Magnocaricetalia*, включающая 3 союза и 18 ассоциаций.

Ключевые слова: водная растительность, ассоциации, сообщества, порядок *Magnocaricetalia*, класс *Phragmito-Magnocaricetea*, озера, Белорусское Поозерье

Для цитирования: Растительность порядка *Magnocaricetalia* в озерах Белорусского Поозерья / С. Э. Латышев [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. біял. навук. – 2023. – Т. 68, № 4. – С. 303–314. <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2023-68-4-303-314>

Siarhei E. Latyshau, Leanard M. Merzhvinski, Yury I. Vysotski, Uladzislava V. Latyshava

Vitebsk State University named after P. M. Masherov, Vitebsk, Republic of Belarus

VEGETATION OF *MAGNOCARICETALIA* UNION IN THE LAKES OF THE BELARUSIAN LAKELAND

Abstract. The syntaxonomic structure of *Magnocaricetalia* order in the Belarusian Lakeland was studied during 2010–2021 years. 60 descriptions of 21 lakes were analyzed according to the Braun-Blanquet method. It was found that the syntaxonomic structure of *Magnocaricetalia* order contains 3 unions, 9 communities, and 7 variants. Coenoflora of *Magnocaricetalia* order includes 52 species; the largest flora is typical for *Caricetum gracilis* association that contains 23 species. Mesotrophic lakes have 8 associations, eutrophic and dystrophic lakes have 5 and 4 associations, respectively. The *Equiseto fluviatilis-Caricetum rostratae* community is the most distributed and is revealed in 13 lakes. Based on the results of this research and the literature sources, the total syntaxonomic structure of *Magnocaricetalia* order for the Republic of Belarus will include 3 unions and 18 associations.

Keywords: aquatic vegetation, associations, communities, order *Magnocaricetalia*, class *Phragmito-Magnocaricetea*, lakes, Belarusian Lakeland

For citation: Latyshau S. E., Merzhvinski L. M., Vysotski Yu. I., Latyshava U. V. Vegetation of *Magnocaricetalia* union in the lakes of the Belarusian Lakeland. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya biyalagichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological series*, 2023, vol. 68, no. 4, pp. 303–314 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2023-68-4-303-314>

Введение. Водная и околотовдная растительность Белорусского Поозерья изучалась рядом исследователей [1, 2]. Последние комплексные данные о разнообразии сообществ водной растительности для Республики Беларусь отражены в работе Я. М. Степановича [3], согласно которой в составе порядка *Magnocaricetalia* насчитывается 11 ассоциаций. Данная работа представляет собой обобщение материала, полученного за период 2010–2021 гг. в результате описания сообществ класса *Phragmito-Magnocaricetea*, порядка *Magnocaricetalia* 21 озера в 9 районах Витебской области, территориально относящимся к Белорусскому Поозерью.

Объекты и методы исследования. Объектами исследования являлись озера Белорусского Поозерья (табл. 1). Морфометрические показатели приводятся по данным [4]. Трофический статус водоема определяли на основании комплексной классификации озер Беларуси и литературных данных [5]. По степени минерализации обследованные водоемы относятся к среднеминерализованным (содержание растворенных веществ – 181,3–325 мг/л) [6].

Т а б л и ц а 1. Характеристика объектов исследования

T a b l e 1. Characteristics of the objects of research

Озеро	Площадь, км ²	Наибольшая глубина, м	Средняя прозрачность, м	Трофическое состояние	Административный район
Соро	5,31	36,3	3	Мезотрофное	Бешенковичский
Домановское	0,28	–	1,2	Дистрофное	Витебский
Белое	2,4	8,9	3,6	Мезотрофное	Городокский
Берново	2,8	10,9	2,4	Эвтрофное	Городокский
Вымно	7,24	7,8	1	Эвтрофное	Городокский
Езерище	15,39	11,5	0,9	Эвтрофное	Городокский
Лосвидо	11,42	20,2	2,4	Мезотрофное	Городокский
Тиосто	5,35	11,7	1,8	Эвтрофное	Городокский
Черное	1,56	2,5	1,7	Дистрофное	Городокский
Буевское	0,72	13	1	Эвтрофное	Лиозненский
Девинское	2	9,6	1,3	Эвтрофное	Оршанский
Ведето	4,68	–	3,2	Мезотрофное	Полоцкий
Бродонок	0,07	–	2,5	Мезотрофное	Россонский
Декало	0,17	–	1	Эвтрофное	Россонский
Нещердо	27,4	8,1	1	Эвтрофное	Россонский
Ямно	0,92	3,8	0,5	Эвтрофное	Россонский
Кривое	4,5	31,5	5,8	Мезотрофное	Ушачский
Черствятское	9,36	4,3	0,9	Эвтрофное	Ушачский
Будовесь	3,41	10,3	2,4	Мезотрофное	Шумилинский
Лесковичи	0,72	30,7	2,5	Мезотрофное	Шумилинский
Сосна	0,71	22,9	3,5	Мезотрофное	Шумилинский

В основе работы лежит анализ 60 геоботанических описаний сообществ порядка *Magnocaricetalia*, которые проводились на пробных площадках размером от 3 до 100 м². Размер подбирался в соответствии с актуальными рекомендациями [7]. Для определения прозрачности воды использовали диск Секки белого цвета диаметром 30 см. Обилие видов в описании оценивали по шкале Браун-Бланке: г – встречаемость единичная с незначительным проективным покрытием; + – вид встречается редко и характеризуется низким проективным покрытием; 1 – вид встречается часто, проективное покрытие до 5 %; 2 – проективное покрытие 5–25 %; 3 – проективное покрытие 26–50 %; 4 – проективное покрытие 51–75 %; 5 – проективное покрытие вида 76 % и выше. Классы постоянства видов оценивали по 5-балльной шкале: I – вид встречается не более чем в 20 % описаний; II – в 21–40 %; III – в 41–60 %; IV – в 61–80 %; V – в 81–100 % описаний. Номенклатура высших видов растений приводится в соответствии с базой данных WFO Plant List [8], для идентификации видов использовали литературные источники [9–12].

Анализ сообществ выполнен по общепринятым методикам эколого-флористической классификации Браун-Бланке [13, 14]. Выделение ассоциаций осуществлялось по диагностическим видам, для принятия синтаксономических решений и корректного отражения ценотической структуры использовали литературные источники [15–17]. Первичную подготовку и обработку описаний осуществляли с помощью программ Excel и Turboveg [18]. Далее полученные файлы экспортировали в программу Juice для анализа геоботанических описаний с применением алгоритма Twinspan [19]. Для каждой ассоциации, число описаний которой было не менее пяти, в программе Juice выделяли диагностические, константные и доминантные виды. Ассоциации с малым числом описаний не подвергали подобному анализу, диагностические виды для них определяли по доминантам ассоциации. Если коэффициент верности (phidelity, phi-коэффициент) для ассоциации составлял не менее 50, вид считали диагностическим, при превышении значения 80 – высокодиагностическим (выделяли жирным шрифтом) [19]. Константным считался вид, который встречается в ассоциации с частотой не менее 40 %, высококонстантным – с частотой не менее 80 %. В качестве доминантных выступали виды, чье проективное покрытие превышало 25 %, а частота встречаемости составляла не менее 15 %, в качестве высокодоминантных – с частотой встречаемости не менее 30 %.

Кроме того, в зависимости от наличия субдоминантов выделяли варианты ассоциаций с использованием алгоритма Twinspan, которые подвергали проверке программой CAP [20], относящейся к методам ограниченной ординации. В программе CAP анализировали матрицу обилия видов различных сообществ одной ассоциации, которые стандартизировали по образцу $\log_{10}(x + 1)$. Для анализа различия использовали индекс Брея–Кертиса [21]. Число перестановок в пермутационном тесте – 9999. Процент правильной классификации при выделении вариантов не менее 90, уровень значимости (p) < 0,05. При несовпадении результатов программ Juice и CAP для выделения вариантов учитывали результаты анализа последней.

Результаты и их обсуждение. На территории Белорусского Поозерья порядок *Magnocaricetalia* класса *Phragmito-Magnocaricetea* представлен 9 ассоциациями и 7 вариантами.

Продромус растительности порядка *Magnocaricetalia* озер Белорусского Поозерья

Порядок *Magnocaricetalia* Pignatti 1953

Союз *Carici-Rumicion hydrolapathi* Passarge 1964

Акк. *Phragmito australis-Thelypteridetum palustris* Kuiper ex van Donselaar et al. 1961

P. a.-T. p. var. *typica*

P. a.-T. p. var. *Phragmites australis*

Союз *Magno-Caricion elatae* Koch 1926

Акк. *Cladietum marisci* Allorge 1921

Акк. *Equiseto fluviatilis-Caricetum rostratae* Zumpfe 1929

E. f.-C. r. var. *typica*

E. f.-C. r. var. *Phragmites australis*

E. f.-C. r. var. *Nuphar lutea*

Акк. *Ranunculetum linguae* Latyshev ass. nov

Акк. *Menyanthetum trifoliatae* Steffen 1931

Акк. *Scolochloetum festucaceae* Rejewski 1977

S. f. var. *typica*

S. f. var. *Nuphar lutea*

Союз *Magno-Caricion gracilis* Koch 1926

Акк. *Caricetum gracilis* Savich 1926

Акк. *Caricetum acutiformis* Eggler 1933

Акк. *Scirpetum sylvatici* Ralski 1931

Порядок *Magnocaricetalia* Pignatti 1953 объединяет ценозы осоково-болотной растительности. Представлен растительными сообществами, произрастающими на границе водоема и береговой линии, погруженными в воду нижней частью побегов и испытывающими колебания уровня воды. На территории Белорусского Поозерья включает 3 союза и 9 ассоциаций. Ценофлора порядка насчитывает 52 вида.

Т а б л и ц а 2. Синтаксономическая таблица ассоциаций порядка *Magnocaricetalia* класса *Phragmito-Magnocaricetea*

Table 2. Syntaxonomic table of the *Magnocaricetalia* associations order of *Phragmito-Magnocaricetea* class

Показатель	Число видов								
	16	1	19	15	9	12	23	1	5
Число описаний	10	1	16	2	2	13	14	1	1
Среднее число видов в описании	3,8	1	3,6	8,5	6	2,3	3,7	1	5
Среднее проективное покрытие	83	70	62	100	95	48	79	90	100
Ассоциация	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Д. в. акк. <i>Phragmito australis-Thelypteridetum palustris</i>									
<i>Thelypteris confluens</i>	100 ³⁻⁵	.	.	.	.	.	.	.	.
Д. в. акк. <i>Cladietum marisci</i>									
<i>Cladium mariscus</i>	.	100 ⁴	.	.	.	.	.	.	.

Показатель	Число видов								
	16	1	19	15	9	12	23	1	5
Д. в. ас. <i>Equiseto fluviatilis-Caricetum rostratae</i>									
<i>Carex rostrata</i>	.	.	100 ³⁻⁵	.	.	.	.	.	.
<i>Ranunculetum linguae</i>									
<i>Ranunculus lingua</i>	.	.	.	00 ³⁻⁴	.	.	.	.	.
Д. в. ас. <i>Menyanthetum trifoliatae</i>									
<i>Menyanthes trifoliata</i>	.	.	.	.	100 ³⁻⁴	.	.	.	.
Д. в. ас. <i>Scolochloetum festucaceae</i>									
<i>Scolochloa festucacea</i>	.	.	.	.	.	100 ²⁻³	.	.	.
Д. в. ас. <i>Caricetum gracilis</i>									
<i>Carex acuta</i>	.	.	.	.	.	.	100 ³⁻⁵	.	.
Д. в. ас. <i>Caricetum acutiformis</i>									
<i>Carex acutiformis</i>	.	.	.	.	.	.	.	100 ⁵	.
Д. в. ас. <i>Scirpetum sylvatici</i>									
<i>Scirpus sylvaticus</i>	.	.	.	.	.	.	.	.	100 ⁵
Д. в. класса <i>Lemnetea</i>									
<i>Ceratophyllum demersum</i>	.	.	.	.	.	8 ²	.	.	.
<i>Hydrocharis morsus-ranae</i>	.	.	.	50 ¹	.	.	.	.	.
<i>Spirodela polyrhiza</i>	.	.	.	50 ⁺
Д. в. класса <i>Potamogetonetea</i>									
<i>Elodea canadensis</i>	.	.	.	50 ¹	.	.	.	.	.
<i>Myriophyllum sibiricum</i>	.	.	6 ¹	.	.	8 ⁺	.	.	.
<i>Nuphar lutea</i>	.	.	30 ¹⁻²	.	50 ²	31 ²⁻³	7 ²	.	.
<i>Persicaria amphibia</i>	.	.	.	.	.	8 ²	7 ²	.	.
<i>Potamogeton compressus</i>	.	.	6 ⁺
<i>Potamogeton lucens</i>	.	.	6 ¹	.	50 ¹	15 ¹⁻²	.	.	.
<i>Potamogeton perfoliatus</i>	.	.	.	.	.	8 ¹	.	.	.
<i>Ranunculus circinatus</i>	.	.	.	.	.	8 ⁺	.	.	.
Д. в. класса <i>Phragmito-Magnocaricetea</i>									
<i>Acorus calamus</i>	20 ^{+ -1}	.	25 ^{+ -2}	00 ¹⁻²	.	.	7 ²	.	.
<i>Alisma plantago-aquatica</i>	.	.	.	50 ¹	.	.	.	.	.
<i>Butomus umbellatus</i>	.	.	.	50 ^r	.	.	.	.	.
<i>Caltha palustris</i>	.	.	.	.	.	8 ⁽⁺⁾	14 ^{r - +}	.	.
<i>Carex acutiformis</i>	10 ¹	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Carex pseudocyperus</i>	10 ¹	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Cicuta virosa</i>	20 ^{+ -2}	.	.	.	50 ²	8 ⁺	21 ^{+ -2}	.	100 ²
<i>Comarum palustre</i>	20 ²	.	.	.	.	.	7 ⁺	.	.
<i>Eleocharis palustris</i>	.	.	6 ²	.	.	8 ²	7 ¹	.	.
<i>Epilobium hirsutum</i>	.	.	.	.	.	.	14 ^{r - +}	.	.
<i>Equisetum fluviatilis</i>	.	.	44 ^{r -1}	50 ³	50 ⁺	.	14 ²	.	.
<i>Galium palustre</i>	.	.	.	.	.	.	.	.	100 ⁺
<i>Glyceria maxima</i>	.	.	13 ^{+ -1}	50 ³	.	.	.	.	.
<i>Iris pseudacorus</i>	.	.	.	50 ¹	.	.	.	.	.
<i>Lycopus europaeus</i>	30 ^{+ -1}	.	.	.	50 ²	.	7 ^r	.	.
<i>Lysimachia vulgaris</i>	20 ⁻²	.	6 ⁺	.	.	.	14 ¹⁻²	.	.
<i>Lythrum salicaria</i>	10 ⁺	.	6 ⁺	50 ¹	.	.	29 ^{r -1}	.	.
<i>Mentha aquatica</i>	.	.	.	50 ⁺	.	.	14 ^{+ -1}	.	100 ¹
<i>Menyanthes trifoliata</i>	10 ¹	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Myosotis scorpioides</i>	.	.	.	50 ⁺
<i>Ranunculus lingua</i>	.	.	6 ⁺
<i>Rumex hydrolapathum</i>	10 ⁺	7 ⁺	.	.
<i>Phragmites australis</i>	50 ¹⁻²	.	50 ^{+ -2}	.	100 ^{r -1}	15 ¹⁻²	14 ¹⁻²	.	.
<i>Sagittaria sagittifolia</i>	.	.	13 ^{r - +}	50 ^r	.	.	.	.	.
<i>Schoenoplectus lacustris</i>	.	.	13 ^{+ -1}	.	.	.	14 ^{+ -2}	.	.

Окончание табл. 2

Показатель	Число видов								
	16	1	19	15	9	12	23	1	5
<i>Scolochloa festucacea</i>	.	.	6 ²	.	50 ^Г	.	.	.	100 ¹
<i>Scutellaria galericulata</i>	20 ⁺¹	.	.	.	50 ¹	.	14 ^{Г+1}	.	.
<i>Senecio paludosus</i>	.	.	.	.	.	.	7 ⁺	.	.
<i>Sium latifolium</i>	.	.	6 ⁺	.	.	.	7 ¹	.	.
<i>Solanum dulcamara</i>	.	.	.	.	.	.	7 ^Г	.	.
<i>Stachys palustris</i>	.	.	6 ¹	.	.	.	14 ^Г	.	.
<i>Typha angustifolia</i>	.	.	6 ¹	50 ²	.	.	.	.	.
<i>Typha latifolia</i>	20 ¹⁻²	.	.	.	.	.	.	.	.
Прочие виды									
<i>Alnus glutinosa</i>	30 ⁺²	.	.	.	.	.	14 ^Г	.	.
<i>Bidens cernua</i>	10 ^Г	.	.	.	.	.	.	.	.

Примечание. Номера синтаксонов: 1 – *Thelypterido palustris-Phragmitetum australis*, 2 – *Cladietum marisci*, 3 – *Equiseto fluviatilis-Caricetum rostratae*, 4 – *Ranunculetum linguae*, 5 – *Menyanthetum trifoliatae*, 6 – *Scolochloetum festucaceae*, 7 – *Caricetum gracilis*, 8 – *Caricetum acutiformis*, 9 – *Scirpetum sylvatici*. Цифры в таблице отражают частоту встречаемости видов (%), числа в надстрочных знаках – обилие видов по Браун-Бланке.

Союз *Carici-Rumicion hydrolapathi* включает произрастающие на органических субстратах по границе водоемов и переувлажненных местообитаний сообщества, которые способны формировать сплавины. В составе союза 1 ассоциация.

Ассоциация *Phragmito australis-Thelypteridetum palustris* Kuiperex van Donselaar et al. 1961

Диагностические виды: *Thelypteris confluens*

Константные виды: *Phragmites australis*, *Thelypteris confluens*

Доминантные виды: *Thelypteris confluens*

Сообщества телиптериса болотного обнаружены в 10 обследованных озерах, проанализировано 10 описаний.

Состав. Число видов в ценозах от 1 до 6, среднее число видов в описании – 3,9. Ценофлора насчитывает 16 видов, наибольшая частота встречаемости характерна для *Phragmites australis*, *Lycopus europaeus*, *Alnus glutinosa*, остальные виды наблюдаются в 1–2 описаниях.

Структура. Площадь описаний 5–10 м². Проективное покрытие доминанта 50–80 %, общее проективное покрытие сообществ от 60 до 100 %. Сообщества одноярусные, лишь одно из них одновидовое, остальные в своем составе имеют не менее 3 видов.

Экология. Фитоценозы произрастают на границе берега и воды, в основном на сплавинах, характерны для озер различного типа. Чаще всего имеют вид узких полос шириной около 1 м различной длины.

В ассоциации выделено два варианта. Процент правильной классификации – 90, $p = 0,006$.

Вар. *typica*. Ценофлора варианта насчитывает 11 видов, 8 из которых встречаются по одному разу. В описаниях от 1 до 6 видов (в среднем – 3,4). Сообщества одноярусные, в основном сплавинные, обнаружены в эвтрофных и дистрофных озерах. Проективное покрытие доминанта составляет 50–80 %, общее проективное покрытие сообществ от 70 до 100 %.

Вар. *Phragmites australis*. В состав варианта входят 13 видов, 10 из которых встречаются однократно. В описаниях от 3 до 5 видов (в среднем – 4,4). Сообщества одноярусные, в основном произрастают на сплавинах или заходят в воду на глубину не более 10 см, обнаружены в озерах мезотрофного и эвтрофного типа. Проективное покрытие телиптериса болотного 55–80 %, тростника обыкновенного 5–20 %, общее проективное покрытие сообществ от 60 до 100 %.

Союз *Magno-Caricion elatae* Koch 1926 объединяет злаковые осоково-болотные сообщества мезотрофных водоемов, произрастающие в зоне мелководья на богатых органикой субстратах. В составе союза 3 сообщества, ценофлора представлена 38 видами.

Ассоциация *Cladietum marisci* Allorge 1921

Диагностические виды: *Cladium mariscus*

Константные виды: –

Доминантные виды: *Cladium mariscus*

Ассоциация представлена единственным сообществом, описание которого приведено по результатам исследований оз. Бродонок. *Cladium mariscus* занесен в Красную книгу Республики Беларусь и имеет I категорию охраны [22]. Впервые данный локалитет был обнаружен И. И. Шимко [23]. Ценоз одновидовой одноярусный, проективное покрытие ценозообразователя 60–70 %. Сообщество имеет вид пятна размером около 4 м², грунт – ил, произрастает на глубине до 0,4 м.

Ассоциация *Equiseto fluviatilis-Caricetum rostratae* Zumpfe 1929

Диагностические виды: *Carex rostrata*

Константные виды: *Carex rostrata*, *Equisetum fluviatile*, *Phragmites australis*

Доминантные виды: *Carex rostrata*

Сообщества осоки вздутой обнаружены в 13 обследованных озерах, проанализировано 16 описаний.

Состав. Число видов в ценозах варьируется от 1 до 6, среднее число видов в описании – 3,6. Ценофлора насчитывает 19 видов, 15 из которых относятся к классу *Phragmito-Magnocaricetea*, 4 – к классу *Potamogetonetea*. Наибольшее постоянство характерно для *Phragmites australis*, *Equisetum fluviatile*, 14 видов встречаются в 1–2 описаниях.

Структура. Площадь описаний от 5 до 100 м². Проективное покрытие доминанта 30–70 %, общее проективное покрытие сообществ от 40 до 90 %. Более половины сообществ одноярусные. Второй ярус в двухъярусных сообществах в основном образует *Nuphar lutea*. Также в ассоциации представлен трехъярусный фитоценоз.

Экология. Сообщества произрастают в основном на песчаных грунтах на глубине до 0,8 м в мезотрофных, эвтрофных и дистрофных озерах. Ценозы имеют вид небольших и средних по размеру пятен либо полос шириной до 10 м, площадь варьируется от 7,5 до 1500 м².

По наличию субдоминантов в ассоциации выделено три варианта. Процент правильной классификации – 100, $p = 0,0001$.

Вар. *typica*. В составе варианта насчитывается 11 видов, среднее число видов в описании – 2. Большинство сообществ имеют одноярусную структуру. Произрастают в основном на песчаных грунтах на глубине от 40 до 80 см в мезотрофных и эвтрофных озерах. Проективное покрытие доминанта 30–70 %, общее проективное покрытие сообществ 40–70 %.

Вар. *Phragmites australis*. Ценофлора варианта включает 10 видов, 8 из которых относятся к классу *Phragmito-Magnocaricetea*, среднее число видов в описании – 3,5. Одно сообщество трехъярусное, остальные одноярусные. Произрастают на глубине до 40 см, преимущественно на песчаных грунтах в разнотипных озерах. Проективное покрытие осоки вздутой 45–80 %, тростника обыкновенного 5–25 %, общее проективное покрытие сообществ 50–90 %.

Вар. *Nuphar lutea*. В составе варианта 9 видов, среднее число видов в описании – 4,3. Сообщества двухъярусные. Локализованы на глубине от 40–60 см на песчаных и илистых грунтах в мезотрофных и эвтрофных озерах. Проективное покрытие осоки вздутой 30–50 %, кубышки желтой 10–20 %, общее проективное покрытие сообществ варьируется в узких пределах – от 60 до 70 %.

Ассоциация *Ranunculetum linguae* ass. nov

Номенклатурный тип (*holotypus*) – авторский номер 629: *Ranunculus lingua* – 60 %, *Acorus calamus* – 5, *Glyceria maxima* – 30, *Alisma plantago-aquatica* – 2, *Hydrocharis morsus-ranae* – 5, *Iris pseudacorus* – 2 %, *Mentha aquatica* – +, *Myosotis scorpioides* – +, *Spirodela polyrhiza* 17 – + (Витебская область, Шумилинский р-н, оз. Лесковичи (55.24486° с. ш., 29.63466° в. д.), 22.08.2019, автор – С. Э. Латышев).

Диагностические виды: *Ranunculus lingua*

Константные виды: –

Доминантные виды: *Ranunculus lingua*

Сообщества лютика длиннолистного, обнаруженные и проанализированные в оз. Лесковичи в 2019 г., представлены двумя описаниями. Диагностический и доминантный вид, согласно базе данных [24], принадлежит к классу *Phragmito-Magnocaricetea*, однако в актуальных литературных источниках не приводится информация о его ценозах [3, 17, 24]. Вероятно, при обследовании новых водных объектов будут отмечены новые находки этого сообщества.

Ценофлора ассоциации представлена 15 видами, 12 из которых относятся к классу *Phragmito-Magnocaricetea*, 1 – к классу *Potamogetonetea* и 2 – к классу *Lemnetea*. Среднее число видов в описании – 8,5. Оба ценоза имеют двухъярусную структуру, первый ярус сформирован представителями воздушно-водной растительности. В одном из описаний второй ярус образован погруженными укореняющимися гидрофитами, а во втором – неукореняющимися гидрофитами с плавающими на поверхности воды листьями. Проективное покрытие ценозообразователя 40–60 %, общее проективное покрытие 100 %, площадь до 60 м². Сообщества произрастают на илистых грунтах на глубине до 0,6 м в оз. Лесковичи, прозрачность которого в разные годы исследований колебалась от 1,6 до 3,3 м. По индексу Карлсона они могут быть отнесены либо к эвтрофным, либо к мезотрофным водоемам. Сообщества, наблюдаемые с 2019 по 2022 г., имеют вторичное происхождение. Они находятся с двух сторон от местного пляжа и образовались, скорее всего, в результате регулярного ранее выкашивания сообщества *Phragmitetum australis*.

Ассоциация *Menyanthetum trifoliatae* Steffen 1931

Диагностические виды: *Menyanthes trifoliata*

Константные виды: –

Доминантные виды: *Menyanthes trifoliata*

Сообщества вахты трехлистной обнаружены в двух обследованных озерах, проанализировано два описания.

Состав. Число видов в описании от 5 до 7. Ценофлора насчитывает 9 видов, 7 из которых относятся к классу *Phragmito-Magnocaricetea*, 2 – к классу *Potamogetonetea*. Кроме доминанта в двух описаниях присутствует *Phragmites australis*.

Структура. Площадь описаний 5–21 м². Проективное покрытие ценозообразователя 50–70 %, общее проективное покрытие сообществ 80–100 %. Один ценоз одноярусный, второй трехъярусный. Первый ярус сформирован доминантом и представителями гигрогелофитов или гидрофитов, второй ярус образует *Nuphar lutea*, третий – *Potamogeton lucens*.

Экология. Из двух сообществ одно формирует сплаvinу и имеет вид узкой полосы, второе растет на илесто-песчаном грунте на глубине 0,8 м и имеет вид пятна площадью 20 м².

Ассоциация *Scolochloetum festucaceae* Rejewski 1977

Диагностические виды: *Menyanthes trifoliata*

Константные виды: –

Доминантные виды: *Menyanthes trifoliata*

Сообщества тростянки овсяницеvidной обнаружены в 7 обследованных озерах, проанализировано 13 описаний.

Состав. Количество видов в ценозе варьируется от 1 до 5, среднее число видов в описании – 2,3. Ценофлора ассоциации принадлежит классам *Phragmito-Magnocaricetea*, *Potamogetonetea*, *Lemnetea* и насчитывает 12 видов, 10 из которых встречаются в 1–2 описаниях. С высоким постоянством встречается только *Nuphar lutea*.

Структура. Площадь описаний 10–100 м². Проективное покрытие ценозообразователя 25–50 %, общее проективное покрытие сообществ 25–90 %. Более половины ценозов имеет одноярусную структуру, которую формируют доминант и другие виды воздушно-водной растительности. Реже встречаются трехъярусные сообщества, где второй ярус представлен растениями с плавающими на поверхности воды листьями, а третий ярус – погруженными гидрофитами. При этом всего в 2 описаниях из 13 сообщества имеют двухъярусную структуру, которая представлена либо ярусом плейстофитов, либо ярусом погруженных гидрофитов.

Экология. Ценозы произрастают в основном на песчаных грунтах на глубине от 0,3 до 1,4 м в эвтрофных и мезотрофных озерах. Чаще всего они имеют вид пятен размером около 100–200 м², площадь сообществ варьируется от 10 до 1500 м².

В ассоциации выделено два варианта. Процент правильной классификации – 92, $p = 0,002$.

Вар. **typica**. В составе варианта насчитывается 8 видов, среднее число видов в описании – 1,9. Большая часть сообществ одновидовые, имеют одноярусную структуру. Произрастают на песчаных и илисто-песчаных грунтах на глубине от 30 до 140 см. Проективное покрытие доминанта варьируется от 25 до 50 %, общее проективное покрытие сообществ 25–70 %.

Вар. **Nuphar lutea**. Ценофлора варианта включает 7 видов, среднее число видов в описании – 3,3. Для сообществ в равной степени характерна и двухъярусная, и трехъярусная структура. Произрастают на глубине от 50 до 120 см на песчаных и илисто-песчаных грунтах. Проективное покрытие тростянки овсяницевидной 25–40 %, кубышки желтой 10–50 %, общее проективное покрытие сообществ от 50 до 90 %.

Союз **Magno-Caricion gracilis** Koch 1926 включает осоково-болотные сообщества, произрастающие на мелководье на эвтрофных глинистых отложениях. В составе союза 3 ассоциации, ценофлора насчитывает 27 видов.

Ассоциация **Caricetum gracilis** Savich 1926

Диагностические виды: **Carex acuta**

Константные виды: **Carex acuta**

Доминантные виды: **Carex acuta**

Сообщества осоки острой обнаружены в 10 обследованных озерах, проанализировано 14 описаний.

Состав. Число видов в сообществе варьируется от 1 до 8, среднее число видов в описании – 3,7. Ценофлора насчитывает 23 вида, среди них большинство относится к классу **Phragmito-Magnocaricetea**, 2 вида – представители класса **Potamogetonetea**. Только два вида – **Cicuta virosa** и **Lythrum salicaria** встречаются более чем в двух описаниях.

Структура. Площадь описаний 3–75 м². Проективное покрытие доминанта 50–100 %, общее проективное покрытие сообществ от 50 до 100 %. Лишь один фитоценоз имеет двухъярусную структуру: первый ярус доминант и представители воздушно-водной растительности, второй ярус – виды с плавающими на поверхности воды листьями (**Nuphar lutea**, **Persicaria amphibia**). Все остальные сообщества имеют одноярусную структуру, сформированную доминантом при участии других видов гелофитов, гигрогелофитов и гигрофитов.

Экология. Ценозы произрастают в основном на песчаных грунтах от уреза воды до глубины 0,5 м в эвтрофных и мезотрофных озерах. Сообщества чаще имеют вид узких полос шириной до 3 м, реже – вид небольших пятен размером до 100 м².

Ассоциация **Caricetum acutiformis** Eggler 1933

Диагностические виды: **Carex acutiformis**

Константные виды: –

Доминантные виды: **Carex acutiformis**

Сообщества осоки заостренной обнаружены в оз. Лесковичи в 2021 г. Проанализировано одно описание. Ассоциация представлена одновидовым одноярусным фитоценозом. Общее проективное покрытие сообщества составляет 90 %, размер описания совпадает с размером ассоциации и имеет площадь 8 м². Произрастает на песчаном грунте на глубине 10 см.

Ассоциация **Scirpetum sylvatici** Ralski 1931

Диагностические виды: **Scirpus sylvaticus**

Константные виды: –

Доминантные виды: **Scirpus sylvaticus**

Сообщество камыша лесного обнаружено в оз. Девинское в 2020 г., проанализировано одно описание. Сообщество не является редким, однако из-за биоэкологических особенностей домини-

нанта и конкуренции с другими видами произрастание непосредственно в водной среде не является оптимальным. Согласно современной классификации, ценозы с доминированием камыша лесного относят к классу *Molinio-Arrhenatheretea* и не включают в состав класса *Phragmito-Magnocaricetea* [17]. Однако в связи с особенностями произрастания доминанта и других видов анализируемого сообщества принято решение включить его в состав рассматриваемого класса, как делали и некоторые другие исследователи [15]. Ценофлора ассоциации, кроме доминанта, насчитывает 4 вида, относящихся к классу *Phragmito-Magnocaricetea* (*Scolochloa festucacea*, *Cicuta virosa*, *Galium palustre*, *Mentha aquatica*). Фитоценоз имеет одноярусную структуру, произрастает на илисто-песчаном грунте, размер описания и сообщества 5 м².

Заключение. Флора порядка *Magnocaricetea* представлена 52 видами, 1 из которых занесен в Красную книгу Республики Беларусь. Из видового состава по 1 виду относится к классам *Alno glutinosae-Populetea albae* и *Bidentetea*, 3 вида – к классу *Lemnetea*, 7 видов являются представителями класса *Potamogetonetea*, 40 видов – представителями класса *Phragmito-Magnocaricetea*. Самым богатым видовым составом характеризуется ассоциация *Caricetum gracilis*, в которой обнаружено 23 вида.

Из 9 сообществ порядка в мезотрофных озерах встречаются все, кроме *Scirpetum sylvatici*. В эвтрофных озерах обнаружено 5 ассоциаций: *Phragmito australis-Thelypteridetum palustris*, *Equiseto fluviatilis-Caricetum rostratae*, *Caricetum gracilis*, *Scolochloetum festucaceae*, *Scirpetum sylvatici*. В водоемах дистрофного типа выявлены ценозы *Menyanthetum trifoliatae*, *Phragmito australis-Thelypteridetum palustris*, *Equiseto fluviatilis-Caricetum rostratae*.

Из 27 обследованных озер ассоциации порядка *Magnocaricetea* отмечены в 21 водоеме. Ни одно из сообществ не обнаружено во всех обследованных озерах. Наибольшая распространенность характерна для ассоциации *Equiseto fluviatilis-Caricetum rostratae*, которая произрастает в 13 водоемах. Менее чем в 50 % объектах исследования встречаются сообщества *Phragmito australis-Thelypteridetum palustris*, *Caricetum gracilis*, *Scolochloetum festucaceae* (обнаружены в 10, 10 и 7 водоемах соответственно). Остальные ценозы встречаются редко, в 1–2 водоемах. Из них только ассоциация *Cladietum marisci* сформирована охраняемым видом. К редко встречающимся в изученных водоемах сообществам, сформированным широко распространенными диагностическими видами, относятся *Caricetum acutiformis*, *Menyanthetum trifoliatae*. Ценоз *Ranunculetum linguae* описан впервые. Ассоциация *Scirpetum sylvatici* не часто встречается в водоемах в связи с биоэкологическими особенностями ценозообразователя.

Несмотря на относительно небогатую ценофлору и сходство по глубине произрастания, видовой состав различных сообществ порядка значительно отличается. Наибольшие значения коэффициента видового сходства по Чекановскому–Серенсену характерны для следующих пар ассоциаций: *Caricetum gracilis* – *Phragmito australis-Thelypteridetum palustris* – 0,53, *Caricetum gracilis* – *Equiseto fluviatilis-Caricetum rostratae* – 0,48, *Menyanthetum trifoliatae* – *Scolochloetum festucaceae* – 0,45. Наибольшей специфичностью и несхожестью с другими ассоциациями порядка характеризуются *Cladietum marisci*, *Caricetum acutiformis*, *Scirpetum sylvatici* (средние значения коэффициента видового сходства от 0 до 0,12), так как каждое из данных сообществ представлено единственным описанием, число видов в которых варьируется от 1 (для первых двух) до 5 (для последнего).

Синтаксономическая структура порядка *Magnocaricetea* для обследованных озер Белорусского Поозерья представлена 3 союзами, 9 ассоциациями и 7 вариантами. По сравнению с имеющимися литературными источниками впервые для Беларуси приводятся описание и характеристика сообществ *Phragmito australis-Thelypteridetum palustris*, *Ranunculetum linguae*, *Menyanthetum trifoliatae* [25–27]. С учетом полученных результатов и литературных данных итоговая структура порядка *Magnocaricetea* для Беларуси будет включать 3 союза и 18 ассоциаций и по разнообразию занимать промежуточное положение между Литвой и Украиной. Для Литвы в составе порядка *Magnocaricetea* приводится 14 ассоциаций [28], для Украины – 21 [29].

Список использованных источников

1. Мартыненко, В. П. Флора и растительность озер северо-восточной части Белорусского Поозерья : автореф. дис. ... канд. биол. наук / В. П. Мартыненко ; Белорус. гос. ун-т. – Минск, 1972. – 19 с.
2. Высшая растительность озера Белое (Сурмино) и тенденции ее изменения / С. Э. Латышев [и др.] // Весн. Віцеб. дзярж. ун-та. – 2013. – № 5. – С. 69–75.
3. Сцепановіч, Я. М. Фітаразнастайнасць расліннасці Беларусі / Я. М. Сцепановіч // Ботаника : (исследования) : сб. науч. тр. / Нац. акад. наук Беларуси, Отд-ние биол. наук [и др.]. – Минск, 2006. – Вып. 34. – С. 264–281.
4. Блакітная кніга Беларусі (Водныя аб'екты Беларусі) : энцыклапедыя / пад рэд. Н. А. Дзісько [і інш.]. – Мінск : Беларус. Энцыкл., 1994. – 415 с.
5. Лопух, П. С. Общая лимнология : пособие для студентов геогр. фак. [Электронный ресурс] / П. С. Лопух, О. Ф. Якушко. – Минск : БГУ, 2011. – Режим доступа: <http://elib.bsu.by/handle/123456789/38343>. – Дата доступа: 29.01.2021.
6. Ежегодник качества поверхностных вод по гидрохимическим и гидробиологическим показателям на территории Республики Беларусь. – Минск, 2009–2022.
7. Голуб, В. Б. Использование геоботанических описаний в качестве коллекции образцов для классификации растительности / В. Б. Голуб // Растительность России. – 2011. – № 17–18. – С. 70–83.
8. WFO Plant List [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.theplantlist.org>. – Date of access: 18.09.23.
9. Определитель высших растений Беларуси / Т. А. Сауткина [и др.]; под ред. В. И. Парфенова. – Минск: Дизайн ПРО, 1999. – 472 с.
10. Лисицына, Л. И. Флора водоемов Волжского бассейна. Определитель сосудистых растений / Л. И. Лисицына, В. Г. Папченков, В. И. Артеменко. – М. : Т-во науч. изданий КМК, 2009. – 219 с.
11. Флора Беларуси. Сосудистые растения : в 6 т. / под общ. ред. В. И. Парфенова ; Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т эксперим. ботаники им. В. Ф. Купревича. – Минск : Беларус. навука, 2013. – Т. 2. Liliopsida (Acoraceae, Alismataceae, Araceae, Butomaceae, Commelinaceae, Hydrocharitaceae, Juncaginaceae, Lemnaceae, Najadaceae, Poaceae, Potamogetonaceae, Scheuchzeriaceae, Sparganiaceae, Typhaceae, Zannichelliaceae) / Д. И. Третьяков [и др.]. – 447 с.
12. Флора Беларуси. Сосудистые растения : в 6 т. / под общ. ред. В. И. Парфенова ; Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т эксперим. ботаники им. В. Ф. Купревича. – Минск : Беларус. навука, 2017. – Т. 3. Liliopsida (Agavaceae, Alliaceae, Amaryllidaceae, Asparagaceae, Asphodelaceae, Cannaceae, Colchiaceae, Convallariaceae, Cyperaceae, Dioscoreaceae, Iridaceae, Ixioliriacae, Nemerocallidaceae, Hostaceae, Hyacinthaceae, Juncaceae, Liliaceae, Melanthiaceae, Ophiopogonaceae, Orchidaceae, Pontederiaceae, Tofieldiaceae, Trilliaceae) / Д. В. Дубовик [и др.]. – 573 с.
13. Braun-Blanquet, J. Übersicht der Pflanzengesellschaften Rätens (III) / J. Braun-Blanquet // Vegetatio. – 1949. – N 1 (fasc. 4–5). – S. 283–316.
14. Бобров, А. А. Описание растительных сообществ в водоемах и водотоках и подходы к их классификации методом Браун-Бланке / А. А. Бобров, Е. В. Чемерис // Гидробиотика: методология, методы : материалы Шк. по гидробиотике (Борок, 08–12 апр. 2003 г.) / Рос. акад. наук. Ин-т биологии внутр. вод им. И. Д. Папанина ; науч. ред. В. Г. Папченков. – Рыбинск, 2003. – С. 105–117.
15. Чепинога, В. В. Флора и растительность водоемов Байкальской Сибири / В. В. Чепинога ; отв. ред. О. А. Аненхонов. – Иркутск : Изд-во Ин-та географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, 2015. – 468 с.
16. Vegetation of Europe: Hierarchical floristic classification of vascular plant, bryophyte, lichen, and algal communities / L. Mucina [et al.] // Veget. Sci. – 2016. – Vol. 19, N S1. – P. 3–264. <https://doi.org/10.1111/avsc.12257>
17. Classification of the European marsh vegetation (*Phragmites Magnocaricetea*) to the association level / F. Landucci [et al.] // Appl. Veget. Sci. – 2020. – Vol. 23, N 2. – P. 297–316. <https://doi.org/10.1111/avsc.12484>
18. Hennekens, S. M. TURBOVEG, a comprehensive data base management system for vegetation data / S. M. Hennekens, J. H. J. Schaminée // J. Veget. Sci. – 2001. – Vol. 12, N 4. – P. 589–591. <https://doi.org/10.2307/3237010>
19. Tichy, L. Juice program for management, analysis and classification of ecological data / L. Tichy, J. Holt. – Brno : Masaryk University, 2006. – 98 p.
20. Anderson, M. J. CAP: a FORTRAN computer program for canonical analysis of principal coordinates / M. J. Anderson. – Department of statistics, University of Auckland, 2004. – 14 p.
21. Шитиков, В. К. Макроэкология речных сообществ: концепции, методы, модели / В. К. Шитиков, Т. Д. Зинченко, Г. С. Розенберг. – Тольятти : Кассандра, 2011. – 255 с.
22. Красная книга Республики Беларусь. Растения: редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды дикорастущих растений / редкол. : И. М. Качановский (предс.) [и др.]. – 4-е изд. – Минск : Беларус. энцыкл., 2015. – 448 с.
23. Шимко, И. И. О новом местонахождении *Cladium mariscus* (L.) Pohl в Беларуси / И. И. Шимко, С. С. Терещенко, И. П. Вознячук // Весн. Віцеб. дзярж. ун-та. – 2014. – № 2. – С. 66–74.
24. FloraVeg.EU [Electronic resource]. – Mode of access: <https://floraveg.eu/vegetation>. – Date of access: 20.08.2022.
25. Прибрежно-водная растительность приграничных территорий Брянской (Россия), Гомельской (Беларусь) и Черниговской (Украина) областей / Л. Н. Анищенко [и др.]. – Чернигов : Десна Полиграф, 2014. – 176 с.
26. Савицкая, К. Л. Новые местонахождения водных и околководных растений в центральной части подзоны бореальных ландшафтов Беларуси / К. Л. Савицкая, М. А. Джус, И. М. Степанович // Вестн. БГУ. Сер. 2, Химия. Биология. География. – 2013. – № 2. – С. 52–57.
27. Савицкая, К. Л. Водная и прибрежно-водная растительность Любанского района / К. Л. Савицкая // Сб. работ 71-й науч. конф. студентов и аспирантов Белорус. гос. ун-та: в 3 ч. (Минск, 18–21 мая 2014 г.) / редкол. : С. А. Захаркевич [и др.]. – Минск, 2014. – Ч. 1. – С. 284–288.

28. Balevičienė, J. Qualitative and quantitative parameters of phytocenoses in Lithuanian lakes of different trophic state / J. Balevičienė // *Ecologija*. – 2006. – N 2. – P. 34–43.

29. Продромус рослинності України / Д. В. Дубина [и др.] ; под ред. Д. В. Дубина. – Київ : Навук. думка, 2019. – 784 с.

References

1. Martynenko V. P. *Flora and vegetation of the lakes of the Belorussian Lakeland north-east part*. Abstract of Ph. D. diss. Minsk, 1972. 19 p. (in Russian).
2. Latyshev S. E., Merzhvinskii L. M., Vysotskii Yu. I., Martynenko V. P. Upper vegetation of Lake Belye (Surmino) and tendencies of its transformation. *Vesnik Vitsebskaga dzyarzhavnaga universiteta* [Bulletin of Vitebsk State University], 2013, no. 5, pp. 69–75 (in Russian).
3. Stepanovich Ya. M. Phytodiversity of vegetation of Belarus. *Botanika: (issledovaniya): sbornik nauchnykh trudov* [Botany: (research): collection of scientific works]. Minsk, 2006, iss. 34, pp. 264–281 (in Russian).
4. Dzis'ko N. A., Kurlovich M. M., Malashevich Ya. V., Zagardni V. G., Samuel' S. P., Sachanka B. I., Khauratovich I. P., Yakushka V. P. (eds.). *The Blue Book of Belarus (water project of Belarus)*. Minsk, Belaruskaya Entsyklapedyya Publ., 1994. 415 p. (in Belarusian).
5. Lopukh P. S., Yakushko O. F. *General limnology*. Minsk, Belarusian State University, 2011. Available at: <http://elib.bsu.by/handle/123456789/38343> (accessed 29.01.2021) (in Russian).
6. *Yearbook on surface water quality by hydrochemical and hydrobiological indicators on the territory of the Republic of Belarus*. Minsk, 2009–2022 (in Russian).
7. Golub V. B. Using vegetation relevés as a sample collection for classification of plant communities. *Rastitel'nost' Rossii* [Vegetation of Russia], 2011, no. 17–18, pp. 70–83 (in Russian).
8. *WFO Plant List [Electronic resource]*. Available at: <http://www.theplantlist.org> (accessed 18.09.23) .
9. Sautkina T. A., Tret'yakov D. I., Zubkevich G. I., Kozlovskaya N. V., Parfenov V. I., Blazhevich R. Yu. *Key to higher plants of Belarus*. Minsk, Dizain PRO Publ., 1999. 472 p. (in Russian).
10. Lisitsyna L. I., Papchenkov V. G., Artemenko V. I. *Flora of the Volga basin. Key to higher plants*. Moscow, Tovarishchestvo nauchnykh izdaniy KMK Publ., 2009. 219 p. (in Russian).
11. Tret'yakov D. I., Dubovik D. V., Skuratovich A. N., Parfenov V. I., Yakovleva I. M., Lebed'ko V. N., Bednarskaya I. A., Lazarevich S. V., Zhitenev L. A. *Flora of Belarus. Vascular plants. Vol. 2. Liliopsida (Acoraceae, Alismataceae, Araceae, Butomaceae, Commelinaceae, Hydrocharitaceae, Juncaginaceae, Lemnaceae, Najadaceae, Poaceae, Potamogetonaceae, Scheuchzeriaceae, Sparganiaceae, Typhaceae, Zannichelliaceae)*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2013. 447 p. (in Russian).
12. Dubovik D. V., Skuratovich A. N., Parfenov V. I., Savchuk S. S., Lebed'ko V. N., Tret'yakov D. I., Dmitrieva S. A., Yakovleva I. M. *Flora of Belarus. Vascular plants. Vol. 3. Liliopsida (Agavaceae, Alliaceae, Amaryllidaceae, Asparagaceae, Asphodelaceae, Cannaceae, Colchiaceae, Convallariaceae, Cyperaceae, Dioscoreaceae, Iridaceae, Ixioliriaceae, Hemerocallidaceae, Hostaceae, Hyacinthaceae, Juncaceae, Liliaceae, Melanthiaceae, Ophiopogonaceae, Orchidaceae, Pontederiaceae, Tofieldiaceae, Trilliaceae)*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2017. 571 p. (in Russian).
13. Braun-Blanquet J. Übersicht der Pflanzengesellschaften Rätiens (III). *Vegetatio*, 1949, no. 1 (fasc. 4–5), pp. 283–316 (in Russian).
14. Bobrov A. A., Chemeris E. V. Description of plant communities in reservoirs and streams and approaches to their classification by the Braun-Blanquet method. *Gidrobotanika: metodologiya, metody: materialy Shkoly po gidrobotanike (Borok, 08–12 aprelya 2003 goda)* [Hydrobotany: methodology, methods: materials of the School of Hydrobotany (Borok, April 08–12, 2003)]. Rybinsk, 2003, pp. 105–117 (in Russian).
15. Chepinoga V. V. *Flora and vegetation of waterbodies in Baikal Siberia*. Irkutsk, Publishing house of the Institute of Geography named after V. B. Sochava, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2015. 468 p. (in Russian).
16. Mucina L., Bültmann H., Dierßen K., Theurillat J.-P., Raus T., Čarni A. [et al.]. Vegetation of Europe: Hierarchical floristic classification of vascular plant, bryophyte, lichen, and algal communities. *Vegetation Science*, 2016, vol. 19 no. S1, pp. 3–264. <https://doi.org/10.1111/avsc.12257>
17. Landucci F., Šumberová K., Tichý L., Hennekens S., Aunina L., Biță-Nicolae C. [et al.]. Classification of the European marsh vegetation (*Phragmites Magnocaricetea*) to the association level. *Applied Vegetation Science*, 2020, vol. 23, no. 297–316. <https://doi.org/10.1111/avsc.12484>
18. Hennekens S. M., Schaminée J. H. J. TURBOVEG, a comprehensive data base management system for vegetation data. *Journal of Vegetation Science*, 2001, vol. 12, no. 4, pp. 589–591. <https://doi.org/10.2307/3237010>
19. Tichý L., Holt J. *Juice program for management, analysis and classification of ecological data*. Brno, Masaryk University, 2006. 98 p.
20. Anderson M. J. *CAP: a FORTRAN computer program for canonical analysis of principal coordinates*. Department of statistics, University of Auckland. 2004. 14 p.
21. Shitikov V. K., Zinchenko T. D., Rozenberg G. S. *Macroecology of river communities: observations, methods, models*. Tol'yatti, Kassandra Publ., 2011. 255 p. (in Russian).
22. Kachanovskii I. M., Nikiforov M. E., Parfenov V. I., Borodin O. I., Pugachevskii A. V., Baichorov V. M., Gapienko O. S., Giryayev A. S., Evdaseva T. P. (eds.). *Red book of the Republik of Belarus. Plants: rare and endangered species of world plants. 4rd ed.* Minsk, Belaruskaya Entsyklapedyya Publ., 2015. 448 p. (in Russian).
23. Shimko I. I., Tereshchenko S. S., Voznyachuk I. P. About new location of *Cladium mariscus* (L.) Pohl in Belarus. *Vesnik Vitsebskaga dzyarzhavnaga universiteta* [Bulletin of Vitebsk State University], 2014, no. 2, pp. 66–74 (in Russian).

24. *FloraVeg.EU* Available at: <https://floraveg.eu/vegetation> (accessed 20.08.2022).

25. Anishchenko L. N., Bulokhov A. D., Daineko N. M., Karpenko Yu. A., Kirienko S. V., Lukash A. V., Panasenko N. N., Romanova Yu. N., Semenishchenkov Yu. A., Skovorodnikova N. A., Timofeev S. F. *Helophyte vegetation of the border areas of the Bryansk (Russia), Gomel (Belarus) and Chernigov (Ukraine) regions*. Chernigov, Desna Poligraf Publ., 2014. 176 p. (in Russian).

26. Savitskaya L. N., Dzhus M. A. New locations of aquatic and near-aquatic plants in the central part of the subzone of boreal landscapes of Belarus. *Vestnik BGU. Ser. 2, Himiya. Biologiya. Geografiya =BSU Herald. Ser. 2. Chemistry. Biology. Geography*, 2013, no. 2, pp. 52–57 (in Russian).

27. Savitskaya K. L. Aquatic and helophyte vegetation of the Luban region. *Sbornik rabot 71-i nauchnoi konferentsii studentov i aspirantov Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta (Minsk, 18–21 maya 2014 goda). Chast' 1* [Collection of works of the 71st scientific conference of undergraduate and graduate students of the Belarusian State University (Minsk, May 18–21, 2014). Pt. 1]. Minsk, 2014, pp. 284–288 (in Russian).

28. Balevičienė J. Qualitative and quantitative parameters of phytocenoses in Lithuanian lakes of different trophic state. *Ecologija*, 2006, no. 2, pp. 34–43.

29. Dubina D. V., Dzyuba T. P., Emel'yanova S. M., Bagrikova N. O., Borisova O. V., Borsukevich L. M. [et al.]. *Prodrome of the vegetation of Ukraine*. Kyiv, Naukova dumka Publ., 2019. 784 p. (in Ukrainian).

Информация об авторах

Латышев Сергей Эдуардович – мл. науч. сотрудник, ст. преподаватель. Витебский государственный университет имени П. М. Машерова (Московский пр., 33, 210038, г. Витебск, Республика Беларусь). <https://orcid.org/0000-0003-0365-3843>. E-mail: slatyshev86@gmail.com

Мержвинский Леонард Михайлович – канд. биол. наук, вед. науч. сотрудник. Витебский государственный университет имени П. М. Машерова (Московский пр., 33, 210038, г. Витебск, Республика Беларусь). <https://orcid.org/0000-0003-3038-0385>. E-mail: leonardm@tut.by

Высоцкий Юрий Иванович – специалист отдела организации и сопровождения инновационной деятельности, ст. науч. сотрудник. Витебский государственный университет имени П. М. Машерова (Московский пр., 33, 210038, г. Витебск, Республика Беларусь). E-mail: yura-v@tut.by

Латышева Владислава Викторовна – мл. науч. сотрудник. Витебский государственный университет имени П. М. Машерова (Московский пр., 33, 210038, г. Витебск, Республика Беларусь). E-mail: vlada.krivko@mail.ru

Information about the authors

Siarhei E. Latyshau – Junior Researcher, Senior Lecturer. Vitebsk State University named after P. M. Mashero (33, Moskovskiy Ave., 210038, Vitebsk, Republic of Belarus). <https://orcid.org/0000-0003-0365-3843>. E-mail: slatyshev86@gmail.com

Leonard M. Merzhvinski – Ph. D. (Biol.), Leading Researcher. Vitebsk State University named after P. M. Mashero (33, Moskovskiy Ave., 210038, Vitebsk, Republic of Belarus). <https://orcid.org/0000-0003-3038-0385>. E-mail: leonardm@tut.by

Yury I. Vysotski – Specialist of the Department of organization and support of innovative activities, Senior Researcher. Vitebsk State University named after P. M. Mashero (33, Moskovskiy Ave., 210038, Vitebsk, Republic of Belarus). E-mail: yura-v@tut.by

Uladzislava V. Latyshava – Junior Researcher. Vitebsk State University named after P. M. Mashero (33, Moskovskiy Ave., 210038, Vitebsk, Republic of Belarus). E-mail: vlada.krivko@mail.ru

ISSN 1029-8940 (Print)
ISSN 2524-230X (Online)
УДК 579.61: 616-022.7
<https://doi.org/10.29235/1029-8940-2023-68-4-315-324>

Поступила в редакцию 29.12.2022
Received 29.12.2022

Ю. М. Капустина, Л. В. Рубаник, Н. П. Шмелева, Н. В. Сивец, Е. Е. Григорьева

*Республиканский научно-практический центр эпидемиологии и микробиологии,
Минск, Республика Беларусь*

ПЦР В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ДЛЯ ИНДИКАЦИИ ПРЕДСТАВИТЕЛЕЙ ПОРЯДКА CHLAMYDIALES: НЕОБХОДИМОСТЬ РАЗРАБОТКИ И ОСНОВНЫЕ АНАЛИТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕТОДА

Аннотация. Заболевания органов дыхания занимают доминирующее положение в структуре болезней, этиология которых зачастую остается невыясненной. Во многом это обусловлено недостаточной изученностью всего спектра патогенов, вызывающих респираторные заболевания, а также отсутствием подходов к их индикации и идентификации. Благодаря постоянному прогрессу молекулярной биологии идентифицирован ряд родственных хламидиям бактерий, включая хламидияподобные микроорганизмы, часть из которых связана с респираторными заболеваниями человека. Роль атипичных возбудителей, таких как хламидияподобные микроорганизмы *Parachlamydia acanthamoebae* и *Simkania negevensis*, в патологии респираторного тракта человека активно изучается.

Разработан и оптимизирован метод на основе ПЦР в режиме реального времени, который способен выявлять ДНК как хламидий, так и хламидияподобных микроорганизмов (*Parachlamydia acanthamoebae* и *Simkania negevensis*). Метод характеризуется высокой специфичностью и воспроизводимостью, а также аналитической чувствительностью на уровне $8,7 \cdot 10^3$ ГЭ/мл. Его применение даст возможность оценить вклад данных атипичных возбудителей в этиологическую структуру инфекционных заболеваний респираторного тракта.

Ключевые слова: хламидии, хламидияподобные микроорганизмы, полимеразная цепная реакция, бронхит, пневмония

Для цитирования: ПЦР в режиме реального времени для индикации представителей порядка Chlamydiales: необходимость разработки и основные аналитические характеристики метода / Ю. М. Капустина [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. біял. навук. – 2023. – Т. 68, № 4. – С. 315–324. <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2023-68-4-315-324>

Yulia M. Kapustina, Lyudmila V. Rubanik, Natalia P. Shmeleva, Natalia V. Sivets, Elena E. Grigorieva

Republican Scientific and Practical Center of Epidemiology and Microbiology, Minsk, Republic of Belarus

REAL-TIME PCR FOR INDICATION OF REPRESENTATIVES OF CHLAMYDIALES ORDER: NEEDS FOR DEVELOPMENT AND MAIN ANALYTICAL CHARACTERISTICS OF THE METHOD

Abstract. Respiratory diseases occupy a dominant position in the structure of morbidity, often the etiology of which remains unclear. This situation is largely due to the lack of knowledge of the entire spectrum of pathogens that cause respiratory diseases, as well as the lack of approaches to their indication and identification. Thanks to constant progress of molecular biology, a number of bacteria related to chlamydia have been identified, some of which are associated with human respiratory diseases, including chlamydia-like microorganisms. The role of atypical pathogens such as chlamydia-like microorganisms *Parachlamydia acanthamoebae*, and *Simkania negevensis* in the pathology of the human respiratory tract is still not fully understood.

A real-time PCR-based method has been developed and optimized. It is capable of detecting the DNA of both chlamydia and chlamydia-like microorganisms (*Parachlamydia acanthamoebae* and *Simkania negevensis*). The method is characterized by high specificity and reproducibility, as well as by analytical sensitivity at a level of $8.7 \cdot 10^3$ GE/ml. Its use will make it possible to assess the contribution of these atypical pathogens to the etiological structure of infectious diseases of the respiratory tract.

Keywords: chlamydia, chlamydia-like organisms, polymerase chain reaction, bronchitis, pneumonia

For citation: Kapustina Yu. M., Rubanik L. V., Shmeleva N. P., Sivets N. V., Grigorieva E. E. Real-time PCR for indication of representatives of Chlamydiales order: needs for development and main analytical characteristics of the method. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya biyalagichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological series*, 2023, vol. 68, no. 4, pp. 315–324 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2023-68-4-315-324>

Введение. Заболевания органов дыхания как бактериальной (*Streptococcus pneumoniae*, *Mycoplasma pneumoniae*, *Chlamydophila pneumoniae*, *Legionella pneumophila* и др.), так и вирусной (грипп, парагрипп, респираторно-синцитиальный вирус, аденовирус, коронавирус, риновирус и др.) природы привлекают все большее внимание ученых и врачей разного профиля в связи с их широкой распространенностью, высокой частотой рецидивирования и перехода в хроническую форму [1]. Лабораторная диагностика этих респираторных патогенов достаточно хорошо налажена. Однако, несмотря на это, в 20–30 % случаев, а по мнению ряда авторов, в 50 % случаев заболеваний верхних и нижних дыхательных путей человека этиологическая причина остается неустановленной [2–4]. Это обусловлено, с одной стороны, недостаточной изученностью всего спектра патогенов, вызывающих респираторные заболевания, с другой стороны – отсутствием подходов к их индикации и идентификации. В последние годы рядом исследователей установлен вклад атипичных возбудителей, таких как хламидияподобные микроорганизмы *Parachlamydia acanthamoebae* и *Simkania negevensis*, в респираторную патологию человека [5–7].

Хламидияподобные микроорганизмы (Chlamydia Like Organisms – CLO) получили свое название ввиду сходного двухэтапного цикла развития, включающего внеклеточное инфекционное элементарное тельце и внутриклеточное вегетативное ретикулярное тельце, и идентичности последовательности 16S рРНК не менее чем на 92,5 % и 23S рРНК не менее чем на 91,0 % с семейством Chlamydiaceae [8]. Семейство Chlamydiaceae входит в порядок Chlamydiales и широко известно ввиду того, что включает в себя патогенные для человека микроорганизмы – *S. pneumoniae*, *Chlamydia trachomatis*, *Chlamydia psittaci*, *Chlamydia pecorum* и др. Однако благодаря многолетним медико-биологическим исследованиям были получены сведения и о других представителях этого порядка и кроме семейства Chlamydiaceae было описано еще 8 новых семейств, куда вошли облигатные внутриклеточные бактерии (*Criblamydiaceae*, *Parachlamydiaceae*, *Piscichlamydiaceae*, *Rhabdochlamydiaceae*, *Simkaniaceae*, *Waddliaceae*, *Clavichlamydiaceae*, *Parilichlamydiaceae*) [6]. Некоторые из представителей хламидияподобных микроорганизмов в настоящее время относятся к малоизученным, но имеющим медицинскую значимость микроорганизмам. *P. acanthamoebae* и *S. negevensis* рассматриваются как эмерджентные патогены респираторного тракта человека.

Так, в Иордании при тестировании назофарингеальных мазков от взрослых с внебольничной пневмонией и бронхитом в 57,1 % случаев обнаружена ДНК *S. negevensis* [9]. Только 1 % составила выявляемость ДНК *P. acanthamoebae* у взрослых с респираторными патологиями [10, 11]. Многочисленные исследования показывают, что *P. acanthamoebae* может выживать и размножаться в макрофагах человека, фибробластах легких и пневмоцитах и вызывать тяжелую пневмонию после интраназального заражения мышей в экспериментах *in vivo* [10, 12, 13]. Кроме того, эти облигатные внутриклеточные бактерии могут присутствовать как в каротидных, так и в аортальных атеросклеротических поражениях у пожилых пациентов. Это подтверждается исследованием, в котором в 11,1 % образцов аорты и сонных артерий, полученных от пациентов, перенесших операцию на аорте в связи с атеросклерозом, был выявлен генетический материал *P. acanthamoebae* [14].

Большое количество исследований свидетельствуют о важном значении хламидияподобных микроорганизмов в этиологии заболеваний респираторного тракта у детей. Анализ образцов из носоглотки детей с бронхитами в Израиле показал, что *S. negevensis* явилась причиной заболевания в 25 % случаев [15]. Более поздние исследования того же автора показывают высокую частоту инфицирования *S. negevensis* как у детей с пневмонией (91 %), так и у детей из контрольной группы (97 %) [16]. Также высокий процент детекции данного хламидияподобного патогена отмечен в Канаде – у 63 % детей с бронхитом выявлялась ДНК *S. negevensis* [17]. В США и Великобритании распространенность отмечена на уровне от 16 до 45 % [18, 19]. У 31–33 % детей с респираторно-синцитиальным вирус-негативным бронхитом и респираторным дистресс-синдромом в аспиратах из носоглотки и респираторных секретах обнаруживалась ДНК *P. acanthamoebae* [20, 21].

В то же время встречаются исследования, в которых показано отсутствие ДНК хламидияподобных микроорганизмов при различных патологиях респираторного тракта [7, 22, 23]. Таким образом, можно отметить, что доступные литературные данные отображают широкий

диапазон выявляемости атипичных хламидияподобных микроорганизмов. Вероятно, что такое расхождение результатов может быть связано либо с различиями в подходах к диагностике, либо с географическими вариациями распространенности инфекции.

Учитывая облигатный внутриклеточный цикл репродукции, классические микробиологические методы не способны обнаружить *P. acanthamoebae* и *S. negevensis*. Серологические методы, позволяющие исследовать сыворотку крови на наличие видоспецифических антител, можно применять только при наличии в лаборатории штаммов данных возбудителей и специально приготовленного антигена, так как стандартные диагностические тест-системы не разработаны. Культуральный метод требует специальных клеточных линий или систем и занимает длительное время (7–10 дней). Молекулярно-биологический метод детекции является методом выбора, однако он не апробирован, не стандартизирован и не применяется в нашей стране. Коммерческие ПЦР-тесты используются только для обнаружения *C. pneumoniae* и *C. trachomatis*. Наборы для молекулярно-биологической индикации других представителей порядка Chlamydiales и идентификации *P. acanthamoebae* и *S. negevensis* не доступны. Соответственно, исследования, направленные на обнаружение не только хламидий, но и хламидияподобных микроорганизмов, не проводятся, данные о распространенности новых атипичных возбудителей при респираторной патологии отсутствуют.

Цель работы – разработать и оптимизировать условия проведения ПЦР в режиме реального времени для обнаружения ДНК представителей порядка Chlamydiales в клиническом материале.

Материалы и методы исследования. В качестве мишени для детекции ДНК представителей порядка Chlamydiales выбран специфичный для всех представителей участок гена, кодирующего *I6S* рРНК. Для амплификации целевого фрагмента использовали праймеры, описанные J. Lienard с соавт. [5]. Вариация размера ампликона зависит от вида и составляет от 207 до 215 п. н.

В качестве контрольных образцов при обработке ПЦР использовались депонированные в Республиканскую коллекцию патогенных биологических агентов штаммы – *C. trachomatis* СТ-3271/Гродно/2015 и СТ-1391/Минск/2014 (№ СКВБ 528 и 530 от 09.11.2018), а также изоляты генотипов E, F, D, G, ДНК выделенного в лаборатории изолята *Waddlia chondrophila* 5320/Беларусь/Минск/2021, пробы ДНК *C. Pneumoniae*, изолят 3398/20 (предоставлены группой ПЦР-диагностики БелМАПО, возглавляемой д-ром мед. наук, профессором С. А. Костюк), и ДНК *C. psittaci*, изолят НЖ (предоставлен заведующим кафедрой эпизоотологии и инфекционных болезней П. А. Красочко УО «Витебская ордена «Знак Почета» государственная академия ветеринарной медицины»). Кроме того, получен контрольный образец на основе рекомбинантной плазмидной ДНК, содержащей фрагмент гена *I6S* рРНК *C. trachomatis*, полученный по методике, описанной ранее [24].

Проведение всех экспериментов осуществляли на амплификаторе планшетного типа QuantStudio 5 (Thermo Fisher Scientific, США). При проведении ПЦР в зависимости от цели опыта использовались различные составы реакционной смеси: 2,5 мкл 10× буфер, 1U SmArt ДНК-полимеразы (ООО «АртБиоТех»), 0,5 мкл смеси dNTP 10 ммоль, праймеры (10–15 пмоль прямого (panChl6F2 5'-CCGCCAACACTGGGACT-3') и 10–15 пмоль обратного праймера (panChl6R2 5'-GGAGTTAGCCGGTGCTTCTTAC-3')), 10–15 пмоль зонда (panChl6S 5'-FAM [6-carboxyfluorescein]-CTACGGGAGGCTGCAGTCGAGAATC-BHQ1[BlackHole Quencher 1]-3'), от 1,5 до 4 ммоль MgCl₂, бидистиллированная вода до объема 20 мкл, 1–15 нг ДНК-матрицы.

Оптимизация ПЦР проводилась с использованием реагентов отечественного производства (ООО «АртБиоТех», ОДО «Праймтех»). С целью наиболее эффективной наработки целевого фрагмента опытным путем осуществляли подбор необходимой концентрации ионов магния, соотношения количества праймеров и гибридизационных зондов, а также количества матрицы. Температурный оптимум отжига праймеров определяли с использованием градиента температур в диапазоне от 62 до 67 °С.

Для оценки аналитической чувствительности готовили последовательные 10-кратные разведения положительного контрольного образца (концентрация плазмиды, содержащей участок гена *I6S* рРНК – 30 нг/мкл). Титрование продолжали до получения разведения 10⁻¹⁰ степени, что соответствует 8,8 копиям/мл плазмиды, содержащей фрагмент гена *I6S* рРНК. Далее проводили амплификацию с оптимизированным составом реакционной среды и условиями ПЦР.

Вычисляли количество копий ДНК в каждом титре образца (от 10^{-1} до 10^{-10}) по формуле [25]:

$$\text{Количество копий ДНК} = \frac{\text{Количество ДНК, нг} \cdot 6,022 \cdot 10^{23}}{\text{Длина ДНК} \cdot 1 \cdot 10^9 \text{ нг/мл} \cdot 650 \text{ Да}},$$

где количество ДНК = 1 нг, $6,022 \cdot 10^{23}$ – число Авогадро, длина ДНК – плазмидная ДНК с клонированной мишенью фрагмента гена *I6S* рРНК (3182 п. н., из них 208 п. н. фрагмента гена *I6S* рРНК, а 2974 – вектор pJet), $1 \cdot 10^9$ – коэффициент пересчета, 650 Да – молекулярная масса одной нуклеотидной пары.

При оценке аналитической специфичности в качестве ДНК матрицы использовали образцы, содержащие ДНК патогенов человека стандартной панели нуклеиновых кислот негриппозных респираторных возбудителей FR-674 (Центр по контролю и профилактике заболеваний (CDC), Атланта, Джорджия, США): *Staphylococcus aureus*, *Legionella pneumophila*, *Mycoplasma pneumoniae*, *Chlamydophila pneumoniae*, *Streptococcus pyogenes*, *Haemophilus influenza*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus epidermidis*, *Lactobacillus plantarum*, *Bacillus cereus*, *Neisseria meningitidis*, *Moraxella catarrhalis*, *Bordetella pertussis*, *Herpes simplex virus-1*, *Herpes simplex virus-5*. Данное исследование проводилось на базе лаборатории гриппа и гриппоподобных заболеваний РНПЦ эпидемиологии и микробиологии (зав. лабораторией канд. мед. наук Н. П. Шмелева). Параллельно с этим изучали способность реакции обнаруживать ДНК как хламидий (*C. pneumoniae*, *C. psittaci*, разных генотипов *C. trachomatis* (E, F, D, G)), так и хламидияподобного микроорганизма (*W. chondrophila*). Результат считался отрицательным, если не наблюдалось накопления флуоресцентного сигнала по каналу FAM и пересечения экспоненциальной кривой пороговой линии, соответствующей анализируемому образцу. При этом регистрировалось присутствие флуоресцентного сигнала для образца, содержащего ДНК *C. trachomatis*, *C. pneumoniae*, *C. psittaci* и *W. chondrophila*.

Воспроизводимость результатов ПЦР оценивали на клинических образцах – 10 содержащих и 10 не содержащих ДНК представителей порядка Chlamydiales. Исследования проводили путем трехкратного тестирования всех образцов. Полученные результаты сравнивали для каждого образца и делали вывод о высокой, средней или низкой воспроизводимости оптимизированной ПЦР.

Все эксперименты проводили в трехкратной повторности, затем вычисляли средние значения и стандартное отклонение. Для обработки данных применяли методы анализа результатов и описательной статистики с использованием встроенных графических модулей программы Excel (Microsoft Corporation, США).

Результаты и их обсуждение. Апробирована ПЦР с праймерами к *I6S* рРНК для одновременной детекции как хламидий, так и хламидияподобных микроорганизмов. В качестве положительных контролей протекания реакции использованы образцы ДНК хламидий *C. trachomatis* СТ-3271/Гродно/2015 и СТ-1391/Минск/2014, *C. pneumoniae* (изолят 3398/20) и *C. psittaci* (изолят НЖ); ДНК хламидияподобного микроорганизма *W. chondrophila* 5320/Беларусь/Минск/2021. В результате показана способность праймеров и гибридационных зондов амплифицировать фрагмент гена *I6S* рРНК с заведомо положительными образцами.

С целью оптимизации и повышения эффективности ПЦР исследовали влияние концентрации ионов магния, разного количества праймеров, зондов и ДНК, а также температурного режима отжига праймеров на амплификацию искомого участка.

Одним из важных компонентов буферной смеси является хлорид магния. Концентрация MgCl_2 влияет на отжиг праймеров и денатурацию ДНК. Повышение концентрации реагента увеличивает выход продукта, но более высокими темпами понижает специфичность. Кроме того, повышение концентрации Mg^{2+} увеличивает температуру плавления ДНК, а при значительном избытке ионов магния (до 10 мМ) на 40–50 % ингибируется Taq-полимераза. Понижение концентрации реагента вызывает низкий выход ПЦР-продукта.

Оптимальная молярность подбиралась эмпирическим путем в процессе оптимизации условий реакции. При сопоставлении полученной информации для каждого образца было отмечено, что изменение концентрации соли в пределах 1,5–4,00 ммоль влияет на процесс амплификации.

Выход специфического ПЦР-продукта был обнаружен при концентрации $MgCl_2$ начиная с 2 и до 4,0 ммоль. На основании полученных опытных данных в дальнейших экспериментах при проведении ПЦР для приготовления реакционных смесей использовали концентрацию соли 2,5 ммоль.

В результате экспериментов по оценке влияния количества в реакционной смеси праймеров и гибридизационных зондов установлено их оптимальное соотношение (рис. 1).

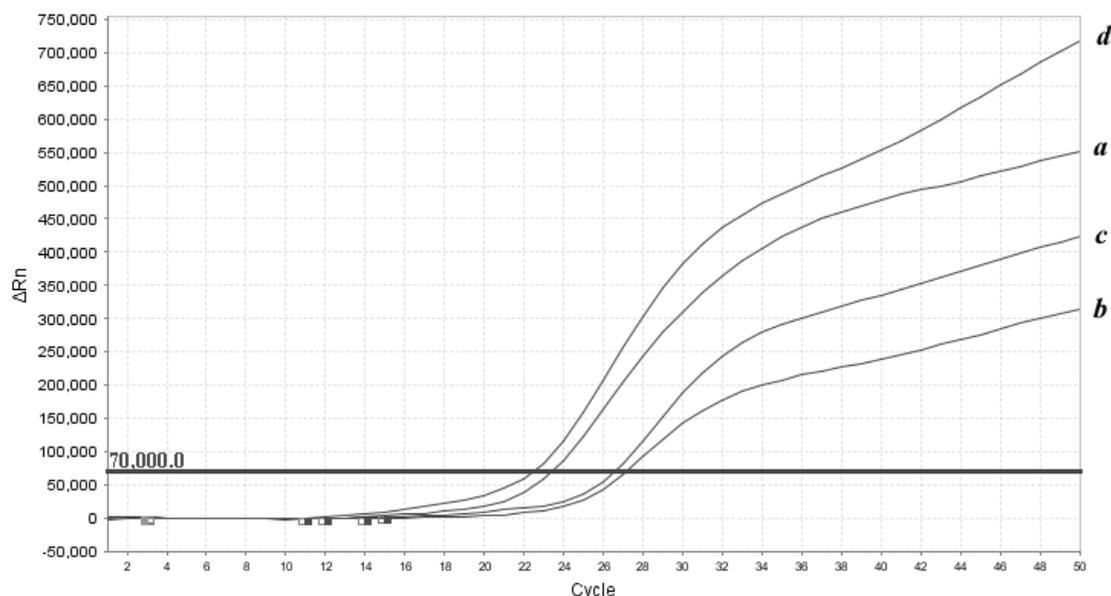


Рис. 1. Кривые роста интенсивности флуоресценции по каналу FAM, соответствующие фрагменту гена *16S* рРНК при использовании в системе различного количественного соотношения праймеров и зонда (*a* – 15 пмоль праймеров и 15 пмоль зонда, *b* – 10 пмоль праймеров и 10 пмоль зонда, *c* – 15 пмоль праймеров и 10 пмоль зонда, *d* – 10 пмоль праймеров и 15 пмоль зонда)

Fig. 1. Fluorescence intensity growth curves along the FAM channel corresponding to the *16S* rRNA gene fragment when using different quantitative ratios of primers and probe in the system (*a* – 15 pmol primers and 15 pmol probe, *b* – 10 pmol primers and 10 pmol probe, *c* – 15 pmol primers and 10 pmol probe, *d* – 10 pmol primers and 15 pmol probe)

Увеличение специфической флуоресценции (ΔRn) происходит по мере возрастания концентрации зонда (рис. 1, *a*, *d*), поэтому для достижения наилучшей эффективности анализа, особенно при необходимости выявления малого числа копий мишени, необходимо избегать ограничения концентрации зонда. Большие величины ΔRn свидетельствуют о высокой эффективности анализа и большей наработке продукта, что наблюдается при внесении в реакционную среду 15 пмоль зонда. При этом наименьшие средние значения порогового цикла амплификации наблюдаются при внесении в реакционную среду по 10 пмоль ($Ct\ 23,17 \pm 0,08$), а также по 15 пмоль ($Ct\ 23,45 \pm 0,11$) прямого и обратного праймеров. Таким образом, определено, что нет статистически значимой разницы при внесении в реакционную смесь по 10 или 15 пмоль праймеров, так как внесение как большего, так и меньшего количества олигонуклеотидов обеспечивает сопоставимый уровень накопления флуоресцентного сигнала, свидетельствующий об образовании продукта реакции. Однако для минимизации расходования реагентов и в целом для уменьшения стоимости реакции рациональным является использование 10 пмоль праймеров.

Количество матрицы, необходимое для оптимальной ПЦР, зависит от источника ДНК, степени ее очистки, длины получаемого ампликона и др. В случае недостаточного количества эпителиальных клеток вследствие неправильного забора биоматериала велика вероятность получения ложноотрицательных результатов. Согласно литературным данным, диапазон используемых в ПЦР концентраций ДНК бактерий составляет от 1 до 10 нг/мкл [26]. В ходе исследования из положительного контрольного образца известной концентрации (30 нг/мкл) готовили рабочие растворы ДНК-матрицы (от 1 до 15 нг/мкл). В результате проведения ПЦР отмечено достаточное

и детектируемое количество ПЦР-продукта при исходном количестве ДНК от 1 до 15 нг/мкл с наилучшим результатом при внесении 5 нг/мкл (среднее значение C_t $13,14 \pm 0,23$, среднее значение максимального уровня флуоресценции $1116667,0 \pm 1153,16$) (рис. 2).

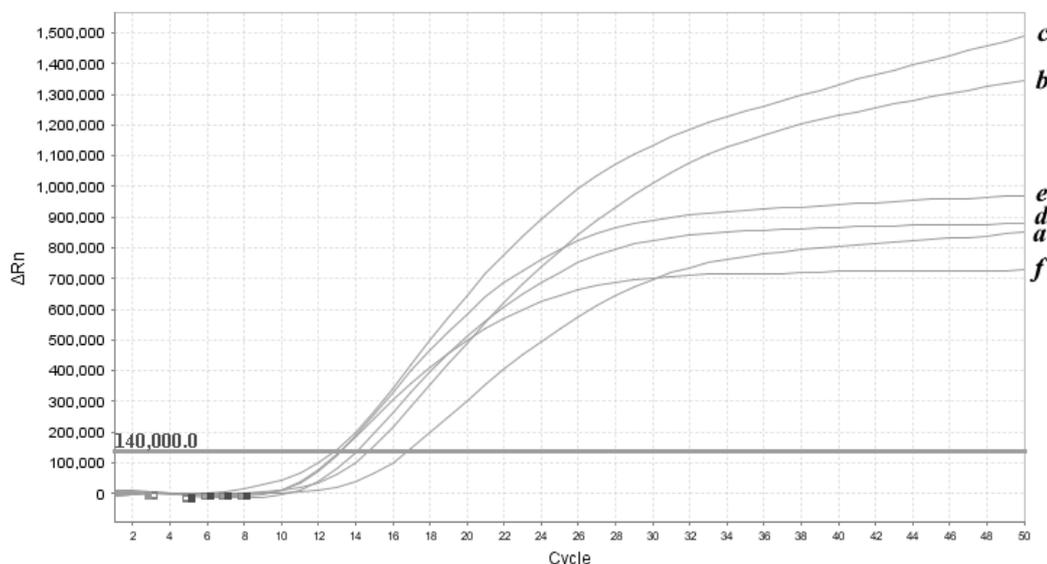


Рис. 2. Влияние концентрации ДНК матрицы (a – 1 нг/мкл; b – 2,5; c – 5; d – 7,5; e – 10; f – 15 нг/мкл) на эффективность ПЦР

Fig. 2. Effect of template DNA concentration (a – 1 ng/ μ l; b – 2.5; c – 5; d – 7.5; e – 10; f – 15 ng/ μ l) on the PCR efficiency

Важным параметром, определяющим основные аналитические характеристики ПЦР, является температура отжига праймеров. Выбор правильной (оптимальной) температуры отжига праймеров для обеспечения специфичности и эффективности ПЦР крайне важен. В случае применения заниженной температуры возрастает вероятность возникновения ложнопозитивной ПЦР, а при завышенной температуре может иметь место плохая наработка целевых ампликонов, что грозит ложнонегативной ПЦР.

Оптимальные температурные условия реакции определяли с использованием градиента температур отжига праймеров в диапазоне от 62 до 67 °С. Были получены сходные результаты для всех температур от 62 до 67 °С, что говорит о возможности амплификации целевого участка в широком диапазоне температур. Однако наилучшее соотношение уровня флуоресценции, порогового цикла амплификации и максимальная эффективность реакции наблюдались при температуре отжига 63 °С.

После оптимизации условий постановки ПЦР в режиме реального времени определены важные характеристики реакции – аналитическая чувствительность, специфичность, а также воспроизводимость.

Для исследования аналитической чувствительности реакции использовали положительный контрольный образец. На его основе готовили пробы 10-кратных разведений последовательного титрования до единичных копий. Проводили ПЦР с образцами в разведении от 10^{-1} до 10^{-10} степени, что соответствует от $8,7 \cdot 10^9$ до $8,8 \cdot 10^9$ ГЭ/мл.

Как видно из данных, представленных на рис. 3, сигмовидные кривые накопления флуоресцентного сигнала имели характерный экспоненциальный рост, что свидетельствовало об образовании специфического продукта амплификации фрагмента гена *16s* рРНК в разведении до 10^{-7} , что соответствует $8,7 \cdot 10^3$ ГЭ/мл.

Полученные результаты оценки аналитической специфичности при исследовании образцов ДНК патогенов человека стандартной панели нуклеиновых кислот негриппозных респираторных возбудителей были отрицательными, за исключением образца, содержащего ДНК *S. pneumoniae*, штамм P1 1428. Вместе с этим показана возможность амплификации ДНК изолятов *S. pneumo-*

niae, *C. psittaci*, разных генотипов *C. trachomatis* (E, F, D, G) и *W. chondrophila*. Таким образом, экспериментально установлено отсутствие неспецифических реакций при тестировании образцов ДНК вирусов и бактерий, потенциально вызывающих респираторные инфекции и выявление ДНК как хламидий (*C. trachomatis*, *C. pneumoniae*, *C. psittaci*), так и хламидияподобных микроорганизмов (*W. chondrophila*), что говорит о высоком уровне специфичности разработанной ПЦР для выявления генетического материала представителей порядка Chlamydiales.

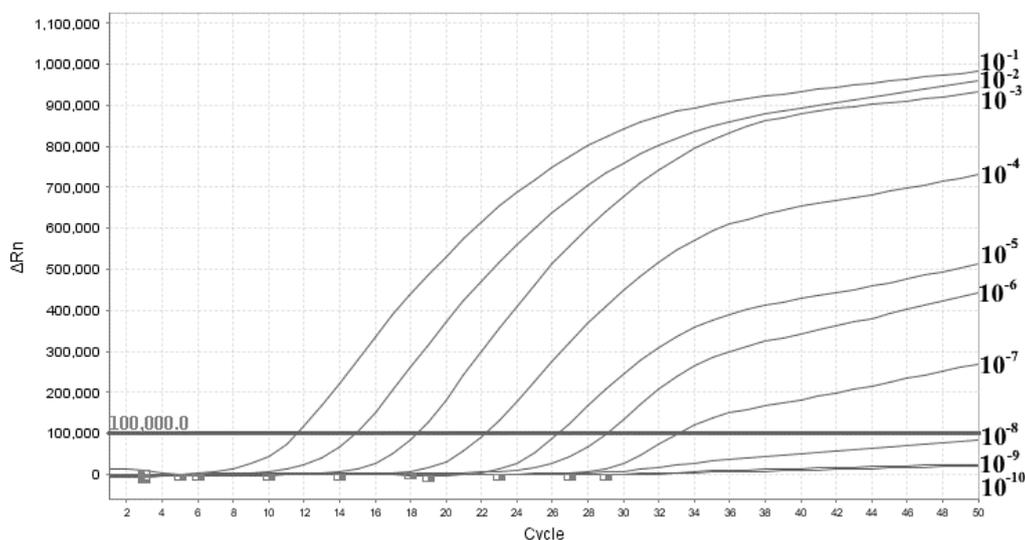


Рис. 3. Результаты исследования аналитической чувствительности ПЦР для детекции ДНК представителей порядка Chlamydiales

Fig. 3. Results on the analytical sensitivity of PCR for the DNA detection of representatives of Chlamydiales order

Одним из важных параметров диагностической ценности ПЦР является воспроизводимость получаемых результатов. Для ее оценки при выявлении ДНК представителей порядка Chlamydiales сформирована отдельная панель образцов ($n = 20$), составленная из 10 содержащих и 10 не содержащих образцов ДНК представителей порядка Chlamydiales. Все образцы были исследованы трехкратно в различных опытах для определения варьирования результатов. Во всех случаях были отмечены идентичные результаты: ПЦР позволила корректно выявить все отрицательные и положительные пробы и получить сходные данные для всех образцов, что свидетельствует о высокой воспроизводимости результатов при использовании разработанной ПЦР для обнаружения ДНК представителей порядка Chlamydiales.

Заключение. Разработан, оптимизирован и успешно апробирован метод на основе ПЦР в режиме реального времени и показана его способность одновременно выявлять ДНК как хламидий, так и хламидияподобных микроорганизмов на основании амплификации специфичного для всех представителей порядка Chlamydiales фрагмента гена *16s* рРНК. С помощью реагентов отечественного производства установлен оптимальный состав реакционной смеси, определены режим постановки и аналитические характеристики ПЦР в режиме реального времени. Наилучшая наработка целевого фрагмента-мишени в геноме наблюдается при содержании в реакционной смеси 2,5 ммоль $MgCl_2$, 10 пмоль прямого и обратного праймеров, 15 пмоль зонда, 5 нг/мкл образца и амплификации при температуре отжига праймеров 63 °С.

Высокие специфичность и воспроизводимость метода, а также его чувствительность на уровне $8,7 \cdot 10^3$ ГЭ/мл свидетельствуют о возможности применения разработанной и оптимизированной ПЦР с детекцией в режиме реального времени для одновременной индикации как хламидий, так хламидияподобных микроорганизмов. Использование данной разработки в качестве дополнительного метода диагностики респираторных патогенов даст возможность оценить вклад хламидияподобных микроорганизмов в этиологическую структуру инфекционных заболеваний респираторного тракта.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Очилова, С. С. Роль *Mycoplasma pneumoniae* в качестве этиологического агента при заболеваниях респираторного тракта / С. С. Очилова, Н. Т. Ёдгорова, Г. Х. Эрнаева // Биология и интегратив. медицина. – 2017. – № 4. – С. 110–128.
2. Greub, G. *Parachlamydia acanthamoebae*, an emerging agent of pneumonia / G. Greub / J. Clin. Microbiol. Infect. – 2009. – Vol. 15, N 1. – P. 18–28. <https://doi.org/10.1111/j.1469-0691.2008.02633>
3. Косяков, С. Я. Острые респираторные инфекции в практике оториноларинголога / С. Я. Косяков, И. Б. Анготоева // Мед. совет. – 2013. – № 7. – С. 26–31.
4. *Parachlamydia acanthamoebae* detected during a pneumonia outbreak in southeastern Finland, in 2017–2018 / K. Hokyнар [et al.] // Microorganisms. – 2019. – Vol. 7, N 5. – P. 141. <https://doi.org/10.3390/microorganisms7050141>
5. Development of a new chlamydiales-specific real-time PCR and its application to respiratory clinical samples / J. Lienard [et al.] // J. Clin. Microbiol. – 2011. – Vol. 49, N 7. – P. 2637–2642. <https://doi.org/10.1128/JCM.00114-11>
6. Twenty years of research into Chlamydia-like organisms: a revolution in our understanding of the biology and pathogenicity of members of the phylum *Chlamydiae* / A. Taylor-Brown [et al.] // Pathog. Dis. – 2015. – Vol. 73, N 1. – P. 1–15. <https://doi.org/10.1093/femspd/ftu009>
7. Vouga, M. *Simkania negevensis*, an insight into the biology and clinical importance of a novel member of the *Chlamydiales* order / M. Vouga, D. Baud, G. Greub // Crit. Rev. Microbiol. – 2017. – Vol. 43, N 1. – P. 62–80. <https://doi.org/10.3109/1040841X.2016.1165650>
8. Taxogenomics of the order *Chlamydiales* / T. Pillonel [et al.] // Int. J. Syst. Evol. Microbiol. – 2015. – Vol. 6. – P. 1381–1393. <https://doi.org/10.1099/ijs.0.000090>
9. Al-Younes, H. M. Molecular evidence for the absence of an association between *Simkania negevensis* and respiratory diseases / H. M Al-Younes, W. Al-Zereini, N. M. Obeidat // J. Med. Microbiol. – 2017. – Vol. 66, N 9. – P. 1324–1327. <https://doi.org/10.1099/jmm.0.000564>
10. Greub, G. *Parachlamydia acanthamoeba* enters and multiplies within human macrophages and induces their apoptosis / G. Greub, J.-L. Mege, D. Raoult // Infect. Immun. – 2003. – Vol. 71, N 10. – P. 5979–5985. <https://doi.org/10.1128/IAI.71.10.5979-5985.2003>
11. Corsaro, D. New chlamydial lineages from freshwater samples / D. Corsaro, D. Venditti, V. Valassina // Microbiology. – 2002. – Vol. 148, N 2. – P. 343–344. <https://doi.org/10.1099/00221287-148-2-343>
12. *Parachlamydia acanthamoebae* enters and multiplies within pneumocytes and lung fibroblasts / N. Casson [et al.] // Microbes Infect. – 2006. – Vol. 8. – P. 1294–1300. <https://doi.org/10.1016/j.micinf.2005.12.011>
13. Severe pneumonia due to *Parachlamydia acanthamoebae* following intranasal inoculation: A mice model / L. Pilloux [et al.] // Microbes Infect. – 2015. – Vol. 17, N 11–12. – P. 755–760. <https://doi.org/10.1016/j.micinf.2015.08.007>
14. Chlamydialike organisms and atherosclerosis / G. Greub [et al.] // Emerg. Infect. Dis. – 2006. – Vol. 12, N 4. – P. 705–706. <https://doi.org/10.3201/eid1204.050751>
15. High prevalence of “*Simkania Z*”, a novel Chlamydia-like bacterium, in infants with acute bronchiolitis / S. Kahane [et al.] // J. Infect. Dis. – 1998. – Vol. 177, N 5. – P. 1425–1429. <https://doi.org/10.1086/517830>
16. Domestic water supplies as a possible source of infection with *Simkania* / S. Kahane [et al.] // J. Infect. – 2007. – Vol. 54, N 1. – P. 75–81. <https://doi.org/10.1016/j.jinf.2006.01.011>
17. High rate of *Simkania negevensis* among Canadian inuit infants hospitalized with lower respiratory tract infections / D. Greenberg [et al.] // Scand. J. Infect. Dis. – 2003. – Vol. 35. – P. 506–508. <https://doi.org/10.1080/00365540310014648>
18. Infection with *Simkania negevensis* in Brooklyn, New York / S. Kumar [et al.] // Pediatr. Infect. Dis. J. – 2005. – Vol. 24, N 11. – P. 989–992. <https://doi.org/10.1097/01.inf.0000183755.24578.0b>
19. Detection of *Simkania negevensis* by culture, PCR, and serology in respiratory tract infection in Cornwall, UK / M. G. Friedman [et al.] // J. Clin. Pathol. – 2006. – Vol. 59, N 3. – P. 331–333. <http://doi.org/10.1136/jcp.2004.025601>
20. New diagnostic real-time PCR for specific detection of *Parachlamydia acanthamoebae* DNA in clinical samples / N. Casson [et al.] // J. Clin. Microbiol. – 2008. – Vol. 46, N 4. – P. 1491–1493. <https://doi.org/10.1128/JCM.02302-07>
21. *Parachlamydia* and *Rhodo-chlamydia* in premature neonates / F. Lamoth [et al.] // Emerg. Infect. Dis. – 2009. – Vol. 15, N 12. – P. 2072–2075. <https://doi.org/10.3201/eid1512.090267>
22. *Simkania negevensis*: Is it a real respiratory pathogen? / M. Kose [et al.] // Acta Microbiol. Immunol. Hung. – 2015. – Vol. 62, N 2. – P. 161–166. <https://doi.org/10.1556/030.62.2015.2.6>
23. Niemi, S. Chlamydia-related bacteria in respiratory samples in Finland / S. Niemi, G. Greub, M. Puolakkainen // Microbes Infect. – 2011. – Vol. 13, N 10. – P. 824–827. <https://doi.org/10.1016/j.micinf.2011.04.012>
24. Получение генно-инженерных конструкций, содержащих диагностически значимые фрагменты генома *Chlamydia trachomatis* / Е. Г. Фомина [и др.] // Современные проблемы инфекционной патологии человека : сб. науч. тр. / М-во здравоохранения Респ. Беларусь ; РНПЦ эпидемиологии и микробиологии ; под ред. В. А. Горбунова. – Минск, 2020. – Вып. 13. – С. 104–109.
25. Lorenz, T. C. Polymerase chain reaction: basic protocol plus troubleshooting and optimization strategies / T. C. Lorenz // J. Visual. Experiments. – 2012. – Vol. 22, N 63. – P. e3998. <https://doi.org/10.3791/3998>
26. Водчиц, Н. В. Подбор условий проведения ISSR–ПЦР для сортовой голубики высокорослой (*Vaccinium corymbosum*) / Н. В. Водчиц, Е. О. Юрченко, А. А. Волотович // Весн. Палес. дзярж. ун-та. Сер. прыродазнаўчых навук. – 2015. – № 1. – С. 3–7.

References

1. Ochilova S. S., Edgorova N. T., Ernaeva G. Kh. The role of *Mycoplasma pneumonia* as etiological agent in disease of respiration tracts. *Biologiya i integrativnaya meditsina* [Biology and Integrative medicine], 2017, no. 4, pp. 110–128 (in Russian).
2. Greub G. *Parachlamydia acanthamoebae*, an emerging agent of pneumonia. *Clinical Microbiology and Infection*, 2009, vol. 15, no. 1, pp. 18–28. <https://doi.org/10.1111/j.1469-0691.2008.02633>
3. Kosyakov S. Ya., Angotoeva I. B. Acute respiratory infections in ENT practice. *Meditsinskii sovet* [Medical Council], 2013, no. 7, pp. 26–31 (in Russian).
4. Hokynar K., Kurkela S., Nieminen T., Saxen H., Vesterinen E. J., Mannonen L., Pietikäinen R., Puolakkainen M. *Parachlamydia acanthamoebae* detected during a pneumonia outbreak in southeastern Finland, in 2017–2018. *Microorganisms*, 2019, vol. 7, no. 5, p. 141. <https://doi.org/10.3390/microorganisms7050141>
5. Lienard J., Croxatto A., Aeby S., Jatou K., Posfay-Barbe K., Gervais A., Greub G. Development of a new chlamydiales-specific real-time PCR and its application to respiratory clinical samples. *Journal of Clinical Microbiology*, 2011, vol. 49, no. 7, pp. 2637–2642. <https://doi.org/10.1128/JCM.00114-11>
6. Taylor-Brown A., Vaughan L., Greub G., Timms P., Polkinghorne A. Twenty years of research into Chlamydia-like organisms: a revolution in our understanding of the biology and pathogenicity of members of the phylum *Chlamydiae*. *Pathogens and Disease*, 2015, vol. 73, no. 1, pp. 1–15. <https://doi.org/10.1093/femspd/ftu009>
7. Vouga M., Baud D., Greub G. *Simkania negevensis*, an insight into the biology and clinical importance of a novel member of the *Chlamydiales* order. *Critical Reviews in Microbiology*, 2017, vol. 43, no. 1, pp. 62–80. <https://doi.org/10.3109/1040841X.2016.1165650>
8. Pillonel T., Bertelli C., Salamin N., Greub G. Taxogenomics of the order *Chlamydiales*. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2015, vol. 6, pp. 1381–1393. <https://doi.org/10.1099/ijs.0.000090>
9. Al-Younes H. M., Al-Zereini W., Obeidat N. M. Molecular evidence for the absence of an association between *Simkania negevensis* and respiratory diseases. *Journal of Medical Microbiology*, 2017, vol. 66, no. 9, pp. 1324–1327. <https://doi.org/10.1099/jmm.0.000564>
10. Greub G., Mege J.-L., Raoult D. *Parachlamydia acanthamoeba* enters and multiplies within human macrophages and induces their apoptosis. *Infection and Immunity*, 2003, vol. 71, no. 10, pp. 5979–5985. <https://doi.org/10.1128/IAI.71.10.5979-5985.2003>
11. Corsaro D., Venditti D., Valassina V. New chlamydial lineages from freshwater samples. *Microbiology*, 2002, vol. 148, no. 2, pp. 343–344. <https://doi.org/10.1099/00221287-148-2-343>
12. Casson N., Medico N., Bille J., Greub G. *Parachlamydia acanthamoebae* enters and multiplies within pneumocytes and lung fibroblasts. *Microbes and Infection*, 2006, vol. 8, pp. 1294–1300. <https://doi.org/10.1016/j.micinf.2005.12.011>
13. Pilloux L., Casson N., Sommer K., Klos A., Stehle J. C., Pusztaszeri M., Greub G. Severe pneumonia due to *Parachlamydia acanthamoebae* following intranasal inoculation: A mice model. *Microbes and Infection*, 2015, vol. 17, no. 11–12, pp. 755–760. <https://doi.org/10.1016/j.micinf.2015.08.007>
14. Greub G., Hartung O., Adekambi T., Alimi Y. S., Raoult D. Chlamydialike organisms and atherosclerosis. *Emerging Infectious Diseases*, 2006, vol. 12, no. 4, pp. 705–706. <https://doi.org/10.3201/eid1204.050751>
15. Kahane S., Greenberg D., Friedman M. G., Haikin H., Dagan R. High prevalence of “*Simkania Z*”, a novel Chlamydia-like bacterium, in infants with acute bronchiolitis. *Journal of Infectious Diseases*, 1998, vol. 177, no. 5, pp. 1425–1429. <https://doi.org/10.1086/517830>
16. Kahane S., Greenberg D., Newman N., Dvoskin B., Friedman M. G. Domestic water supplies as a possible source of infection with *Simkania*. *Journal of Infection*, 2007, vol. 54, no. 1, pp. 75–81. <https://doi.org/10.1016/j.jinf.2006.01.011>
17. Greenberg D., Banerji A., Friedman M. G., Chiu C. H., Kahane S. High rate of *Simkania negevensis* among Canadian inuit infants hospitalized with lower respiratory tract infections. *Scandinavian Journal of Infectious Diseases*, 2003, vol. 35, pp. 506–508. <https://doi.org/10.1080/00365540310014648>
18. Kumar S., Kohlhoff S. A., Gelling M., Roblin P. M., Kutlin A., Kahane S., Friedman M. G., Hammerschlag M. R. Infection with *Simkania negevensis* in Brooklyn, New York. *Pediatric Infectious Disease Journal*, 2005, vol. 24, no. 11, pp. 989–992. <https://doi.org/10.1097/01.inf.0000183755.24578.0b>
19. Friedman M. G., Kahane S., Dvoskin B., Hartley J. W. Detection of *Simkania negevensis* by culture, PCR, and serology in respiratory tract infection in Cornwall, UK. *Journal of Clinical Pathology*, 2006, vol. 59, no. 3, pp. 331–333. <http://dx.doi.org/10.1136/jcp.2004.025601>
20. Casson N., Posfay-Barbe K. M., Gervais A., Greub G. New diagnostic real-time PCR for specific detection of *Parachlamydia acanthamoebae* DNA in clinical samples. *Journal of Clinical Microbiology*, 2008, vol. 46, no. 4, pp. 1491–1493. <https://doi.org/10.1128/JCM.02302-07>
21. Lamoth F., Aeby S., Schneider A., Jatou-Ogay K., Vaudaux B., Greub G. *Parachlamydia* and *Rhadinomydia* in premature neonates. *Emerging Infectious Diseases*, 2009, vol. 15, no. 12, pp. 2072–2075. <https://dx.doi.org/10.3201/eid1512.090267>
22. Kose M., Ekinci D., Gokahmetoglu S., Elmas T., Öztürk M. K. *Simkania negevensis*: Is it a real respiratory pathogen? *Acta Microbiologica et Immunologica Hungarica*, 2015, vol. 62, no. 2, pp. 161–166. <https://doi.org/10.1556/030.62.2015.2.6>
23. Niemi S., Greub G., Puolakkainen M. Chlamydia-related bacteria in respiratory samples in Finland. *Microbes and Infection*, 2011, vol. 13, no. 10, pp. 824–827. <https://doi.org/10.1016/j.micinf.2011.04.012>
24. Fomina E. G., Rubanik L. V., Kapustina Yu. M., Grigor'eva E. E., Zverko V. V. Construction of recombinant plasmids containing diagnostically significant regions of the *Chlamydia trachomatis* genome. *Sovremennyye problemy infektsionnoi*

patologii cheloveka: sbornik nauchnykh trudov [Modern problems of human infectious pathology: a collection of scientific papers]. Minsk, 2020, vol. 13, pp. 104–109 (in Russian).

25. Lorenz T. C. Polymerase chain reaction: basic protocol plus troubleshooting and optimization strategies. *Journal of Visualized Experiments*, 2012, vol. 22, no. 63, p. e3998. <https://doi.org/10.3791/3998>

26. Vodehits N. V., Yurchenko E. O., Volotovich A. A. Study of the optimal conditions for ISSR-PCR in marking of *Vaccinium corymbosum* cultivars. *Vesnik Paleskaga dzyarzhavnaga universiteta. Seryya pryrodaznauchykh navuk* [Bulletin of Polesky State University. Natural Sciences Series], 2015, no. 1, pp. 3–7 (in Russian).

Информация об авторах

Капустина Юлия Михайловна – аспирант, мл. науч. сотрудник. Республиканский научно-практический центр эпидемиологии и микробиологии (ул. Филимонова, 23, 220114, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: kapustinajm@gmail.com

Рубаник Людмила Владимировна – канд. биол. наук, доцент, заведующий лабораторией. Республиканский научно-практический центр эпидемиологии и микробиологии (ул. Филимонова, 23, 220114, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: lab.dsbvi@gmail.com

Шмелева Наталья Петровна – канд. мед. наук, заведующий лабораторией. Республиканский научно-практический центр эпидемиологии и микробиологии (ул. Филимонова, 23, 220114, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: shmelevanataliya@mail.ru

Сивец Наталья Валерьевна – науч. сотрудник. Республиканский научно-практический центр эпидемиологии и микробиологии (ул. Филимонова, 23, 220114, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: sivets_n@mail.ru

Григорьева Елена Евгеньевна – канд. биол. наук, вед. науч. сотрудник. Республиканский научно-практический центр эпидемиологии и микробиологии (ул. Филимонова, 23, 220114, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: grigus@mail.ru

Information about the authors

Yulia M. Kapustina – Postgraduate student, Junior Researcher. Republican Scientific and Practical Center for Epidemiology and Microbiology (23, Filimonov Str., 220114, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kapustinajm@gmail.com

Lyudmila V. Rubanik – Ph. D. (Biol.), Associate Professor, Head of the Laboratory. Republican Scientific and Practical Center for Epidemiology and Microbiology (23, Filimonov Str., 220114, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lab.dsbvi@gmail.com

Natalia P. Shmeleva – Ph. D. (Med.), Head of the Laboratory. Republican Scientific and Practical Center for Epidemiology and Microbiology (23, Filimonov Str., 220114, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: shmelevanataliya@mail.ru

Natalia V. Sivets – Researcher. Republican Scientific and Practical Center for Epidemiology and Microbiology (23, Filimonov Str., 220114, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sivets_n@mail.ru

Elena E. Grigorieva – Ph. D. (Biol.), Leading Researcher. Republican Scientific and Practical Center for Epidemiology and Microbiology (23, Filimonov Str., 220114, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: grigus@mail.ru

ISSN 1029-8940 (Print)

ISSN 2524-230X (Online)

УДК 635.92.055:582.475:631.541

<https://doi.org/10.29235/1029-8940-2023-68-4-325-331>

Поступила в редакцию 01.08.2023

Received 01.08.2023

Е. В. Кондратов, В. И. Торчик²

Центральный ботанический сад НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

ВЛИЯНИЕ СПОСОБОВ ПРИВИВКИ НА ПРИЖИВАЕМОСТЬ И МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПРИВИТЫХ РАСТЕНИЙ РОДА *PINUS* L.

Аннотация. В статье на примере *Pinus sylvestris* «Желтоватая», «Каролина», «Элегантная» селекции ЦБС НАН Беларуси и *Pinus mugo* «Карстенс Винтерголд» показано влияние прививки при двустороннем срезе на черенке с оставлением полоски коры на подвое в расщеп полуодревесневшего побега и прививки черенком в период вегетации в расщеп зеленого побега на приживаемость и морфометрические показатели однолетних привитых растений.

Установлено, что при прививке декоративных форм *Pinus sylvestris* L. наиболее эффективным является способ двустороннего среза на привое, обеспечивающий приживаемость от 86,4 до 100 % и оптимальное развитие кроны. При использовании одревесневших черенков после длительного хранения рекомендуется прививка в расщеп полуодревесневшего побега, что обеспечивает приживаемость около 60 %. При заготовке черенков в период вегетации прививка в расщеп зеленого побега подвоя дает приживаемость от 8,7 до 72,7 %.

Ключевые слова: *Pinus mugo* «Карстенс Винтерголд», *Pinus sylvestris* «Желтоватая», *Pinus sylvestris* «Каролина», *Pinus sylvestris* «Элегантная», прививка, приживаемость, привой, подвой

Для цитирования: Кондратов, Е. В. Влияние способов прививки на приживаемость и морфометрические параметры привитых растений рода *Pinus* L. / Е. В. Кондратов, В. И. Торчик // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. біял. навук. – 2023. – Т. 68, № 4. – С. 325–331. <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2023-68-4-325-331>

Yauhen V. Kandratav, Uladzimir I. Torchyk

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

INFLUENCE OF GRAFTING METHODS ON THE SURVIVAL AND MORPHOMETRIC PARAMETERS OF GRAFTED PLANTS OF THE GENUS *PINUS* L.

Abstract. The article presents the data on the survival and morphometric parameters of annual grafted plants using the grafting by a double-side cut on the handle leaving a bark strip on the rootstock into a split of a semi-lignified shoot and using the grafting by cutting during the growing season into a split of a green shoot. *Pinus sylvestris* “Yellowish”, “Carolina”, “Elegant” that were obtained by breeding in the Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus and *Pinus mugo* “Carstens Wintergold” were used as model objects.

It has been established that the method of double-sided cut on a scion for grafting decorative forms of *Pinus sylvestris* L. is the most effective. This method provides a survival from 86.4 to 100 % and optimal crown development. Grafting into a split of a semi-lignified shoot is recommended when using lignified cuttings after long-term storage. This approach provides a survival of about 60 %. Grafting into a split of the green shoot can be used when harvesting cuttings during the growing season and provides a survival rate of 8.7 to 72.7 %.

Keywords: *Pinus mugo* “Carstens Wintergold”, *Pinus sylvestris* “Yellowish”, *Pinus sylvestris* “Carolina”, *Pinus sylvestris* “Elegant”, grafting, survival, grafter, rootstock

For citation: Kandratav Y. V., Torchyk U. I. Influence of grafting methods on the survival and morphometric parameters of grafted plants of the genus *Pinus* L. *Vesti Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya biyalagichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological series*, 2023, vol. 68, no. 4, pp. 325–331 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2023-68-4-325-331>

Введение. В настоящее время востребованными в зеленом строительстве республики являются сорта видов рода *Pinus* L. как отечественной, так и зарубежной селекции. Общепринятым методом их размножения является прививка сердцевинной на камбий с различными модификациями, включающими подбор оптимальных по возрасту маточных растений и подвоев и сроков прививки, уход за привитыми растениями, использование стимуляторов роста и другие мероприятия [1–4]. В научной литературе имеется информация о прививке сосны в расщеп верху-

шечного побега [5–8] и в боковой зарез [9], приживаемость прививок при которых незначительно варьируется в большую либо меньшую сторону по сравнению с прививкой сердцевинной на камбий. Широко освещена в литературе также межвидовая прививка видов сосны с целью подбора совместимых прививочных компонентов для повышения приживаемости, ускорения роста и плодоношения привитых растений [4, 9, 10].

Ранее нами было предложено для прививки сосны обыкновенной использовать двухлетние привои, что обеспечивало повышение приживаемости и морфометрических показателей однолетних привитых растений [11]. Данный метод является эффективным при возможности заготовки большого количества черенков с маточных растений. Однако при размножении редких растений количество черенков зачастую ограничено, что требует поиска методов, обеспечивающих не только высокую приживаемость, но и бережное отношение к маточным растениям.

Зачастую у исследователей во время экспедиций или командировок заготовка прививочного материала осуществляется не в оптимальные для прививки сроки, что вызывает необходимость их длительного хранения или проведения прививки вегетирующими черенками.

В этой связи заслуживают внимания исследования по более детальному изучению некоторых, на наш взгляд, перспективных способов. Например, способ двустороннего среза на привое с оставлением полоски коры на подвое, предложенный I. Blada и T. Panea для вегетативного размножения *Picea pungens* Engelm. var. *glauca* Regel и *Abies concolor* [(Gold. & Glend.) Lindl.], заключающийся в проведении среза до сердцевинной, а с обратной стороны привоя до камбия и оставлении отделенной полоски коры на подвое, которая накладывается на верхний срез привоя. Согласно данным авторов, использование такого способа обеспечивает соприкосновение четырех слоев камбия, что увеличивает площадь срастания прививочных компонентов и повышает приживаемость более чем в 2 раза [12, 13].

В. И. Торчиком [14] апробирован способ прививки сосны обыкновенной одревесневшим черенком в расщеп полудревесневшего побега, обеспечивающий почти 100%-ную приживаемость.

Для прививки черенков, заготовленных в период вегетации, представляет интерес метод, предложенный S. L. Castro-Garibay с соавт., заключающийся в использовании в качестве привоя свежесрезанных вегетирующих побегов и прививки их в расщеп зеленых побегов подвоя. По данным авторов, приживаемость прививок, выполненных таким способом, составляет от 93 до 100 % [15].

Цель настоящей работы – оценить эффективность указанных способов прививки на примере декоративных форм сосны обыкновенной и сосны горной.

Материалы и методы исследования. Объектами исследования служили садовые формы *Pinus sylvestris* селекции ЦБС НАН Беларуси: «Каролина», «Эlegantная» и «Желтоватая» [16], а также декоративная форма *Pinus mugo* «Карстенс Винтерголд».

Прививка способом двустороннего среза на привое с оставлением полоски коры на подвое [12, 13] проводилась свежесрезанными черенками в первой декаде февраля в условиях отапливаемой теплицы при круглосуточной температуре 20–25 °С и во второй декаде августа в условиях открытого грунта. Контролем служили растения, привитые общепринятым методом – сердцевинной на камбий.

Прививка одревесневшими черенками после длительного хранения (5 мес. в специально оборудованном леднике) и свежесрезанными вегетирующими черенками в фазе начала обособления хвои (*Pinus sylvestris* L.) и полного обособления хвои (*Pinus mugo* Turra) проводились способом в расщеп полудревесневшего побега подвоя [14, 15] в открытом грунте в третьей декаде июня. Развитие оценивали согласно общепринятой методике [17].

Однолетние растения, привитые как в отапливаемой теплице, так и в открытом грунте, притеняли сеткой (степень затенения 55 %). К прижившимся относили растения с полноценным приростом и сформировавшимися почками.

Результаты и их обсуждение. Сравнительная оценка приживаемости прививок сосны обыкновенной «Желтоватая» селекции ЦБС НАН Беларуси методом двустороннего среза на черенке с оставлением полоски коры на подвое показала, что в условиях отапливаемой теплицы она та-

**Влияние способов и сроков прививки на приживаемость
и морфометрические показатели сортов рода *Pinus* L. (M ± m)**
**Influence of grafting methods and timing on the survival
and morphometric parameters of varieties of the genus *Pinus* L. (M ± m)**

Название сорта	Приживаемость, %	Длина, см		Кол-во, шт.		
		осевых побегов	боковых побегов	однолетних побегов	почек на осевых побегах	почек на боковых побегах
Прививка методом двустороннего среза на привое с оставлением полоски коры на подвое, 07.02.2022						
<i>Pinus sylvestris</i> «Желтоватая» (опыт)	100	5,9 ± 0,3*	4,1 ± 0,2*	4,3 ± 0,2*	4,2 ± 0,2*	3,6 ± 0,1*
<i>Pinus sylvestris</i> «Желтоватая» (контроль)	100	3,9 ± 0,2	3,2 ± 0,2	3,7 ± 0,2	3,6 ± 0,2	2,8 ± 0,2
Прививка методом двустороннего среза на привое с оставлением полоски коры на подвое, 17.08.2022						
<i>Pinus sylvestris</i> «Желтоватая» (опыт)	90,0	–	–	–	–	–
<i>Pinus sylvestris</i> «Желтоватая» (контроль)	86,4	–	–	–	–	–
Прививка черенком в период вегетации в расщеп полуодревесневшего побега, 24.06.2022						
<i>Pinus sylvestris</i> «Каролина»	8,7	–	–	–	8 ± 0,4	–
<i>Pinus sylvestris</i> «Элегантная»	19,2	–	–	–	3,4 ± 0,7	–
<i>Pinus sylvestris</i> «Карстенс Винтерголд»	72,7	1,5 ± 0,1	–	1,6 ± 0,2	3,7 ± 0,5	–
Прививка одревесневшим черенком после длительного хранения в расщеп полуодревесневшего побега, 24.06.2022						
<i>Pinus sylvestris</i> «Каролина»	60	2,9 ± 0,2	2,2 ± 0,1	4,3 ± 0,3	3 ± 0,1	2,8 ± 0,3
<i>Pinus sylvestris</i> «Элегантная»	60	2,5 ± 0,2	2,3 ± 0,2	4 ± 0,2	3,1 ± 0,1	3,1 ± 0,1
<i>Pinus sylvestris</i> «Карстенс Винтерголд»	60	2,7 ± 0,2	2,2 ± 0,4	1,9 ± 0,3	4,1 ± 0,6	2,3 ± 0,5

Примечание. * – различия достоверны при $p < 0,05$.

кая же, как и в контрольном варианте. При прививке этим методом в условиях открытого грунта в середине августа приживаемость была несколько выше, чем в контроле (см. таблицу).

Несмотря на почти одинаковую приживаемость, развитие растений, полученных разными способами, отличалось. Так, у растений, привитых способом I. Vlada и T. Panea, длина осевых и боковых побегов относительно контроля была больше на 51,3 и 28,1 %, количество однолетних побегов – на 16,2 %, а почек на осевых и боковых – на 16,7 и 28,6 % соответственно. Однако при этом способе прививки длина хвои однолетних осевых побегов не отличалась от длины хвои контрольных растений, тогда как на боковых побегах хвоя была длиннее, чем у контрольных растений, на 18,8 %. Следует отметить, что толщина осевых и боковых побегов также была больше, чем у контрольных растений, – на 29,2 и 35,3 % соответственно.

Выявленные отличия в развитии растений, по-видимому, обусловлены более быстрым срастанием компонентов прививки за счет большей площади соприкасающихся камбиальных слоев, что, в свою очередь, обеспечивает увеличение поступления питательных веществ к привитому черенку. Продольный срез места прививки (рис. 1) показал, что срастание произошло практически по всей длине соприкосновения привоя и подвоя в обоих вариантах опыта.

В свою очередь, приживаемость сортов при использовании вегетирующих черенков зависела от видовой принадлежности. Так, у сортов сосны обыкновенной «Каролина» и «Элегантная» она составила 8,7 и 19,2 %. Это является вполне удовлетворительным показателем, учитывая, что другие методы прививки в это время не могут быть использованы. У сорта сосны горной «Карстенс Винтерголд» приживаемость при использовании этого способа превышала 70 %. Такой результат обусловлен, по-видимому, большей степенью одревеснения однолетних побегов, так как в условиях республики развитие этого сорта несколько опережает развитие других сортов.

Следует отметить, что в год прививки сорта сосны обыкновенной, привитые вегетирующими черенками, не давали прироста, а происходило лишь отрастание уже проклюнувшейся хвои, вызревание почек и побега (рис. 2, а), количество которых варьировалось в широких пределах (см. таблицу). У сорта сосны горной «Карстенс Винтерголд», привитого в те же сроки, образовывалось до двух коротких побегов, на которых формировались почки (рис. 2, б). Весной следующего года привитые черенки трогались в рост одновременно с подвоем и давали полноценные приросты.



Рис. 1. Срастание привоя и подвоя у *Pinus sylvestris* «Желтоватая» при прививке методами сердцевинной на камбий (а) и двустороннего среза на черенке с оставлением полоски коры на подвое (b) (1 – привой, 2 – подвой, 3 – зона срастания прививочных компонентов, 4 – прижившаяся полоска коры подвоя)

Fig. 1. Accretion of the scion and rootstock in *Pinus sylvestris* “Yellowish” using the grafting method by core on the cambium (a) and by two-sided cut on the handle leaving a bark strip on the rootstock (b) (1 – scion, 2 – rootstock, 3 – fusion zone of grafting components, 4 – accustomed strip of rootstock bark)



Рис. 2. Однолетние привитые растения *Pinus sylvestris* «Элегантная» (a), *Pinus mugo* «Карстенс Винтерголд» (b), привитые черенком в период вегетации в расщеп зеленого побега, и *Pinus sylvestris* «Элегантная» (c), привитое черенком после длительного хранения в расщеп полуодревесневшего побега

Fig. 2. Annual grafted plants *Pinus sylvestris* “Elegant” (a), *Pinus mugo* “Carstens Wintergold” (b) grafted by cuttings during the growing season into a split of a green shoot and *Pinus sylvestris* “Elegant” (c) grafted by cutting after long-term storage into a split of a semi-lignified shoot

У сортов, привитых черенками после длительного хранения, приживаемость составила 60 % и образовались полноценные приросты (рис. 2, c). Диаметр кроны однолетних привитых растений варьировался от $2,9 \pm 0,2$ до $3,6 \pm 0,2$ см, а средняя толщина однолетних осевых и боковых побегов – от $0,5 \pm 0,1$ до $0,6 \pm 0,1$ см, что указывает на хорошее развитие сосудистой системы между привоем и подвоем.

Как следует из представленных в таблице данных, длина осевых и боковых побегов, количество однолетних побегов, а также почек на осевых и боковых побегах свидетельствуют об удовлетворительном развитии однолетних привитых растений и о возможности использования этого метода в практической работе.

Заключение. В результате проведенных исследований установлено, что прививка сортов сосны обыкновенной способом двустороннего среза на привое с оставлением полоски коры на подвое позволяет существенно повысить морфометрические показатели однолетних привитых растений при достаточно высокой приживаемости (от 86,4 до 100 %) как в весенние, так и в летние сроки прививки.

Прививка одревесневшим черенком в расщеп полуодревесневшего побега позволяет добиться 60%-ной приживаемости при использовании привойного материала после его длительного хранения. Приживаемость вегетирующих черенков, привитых в расщеп зеленого побега, варьируется от 8,7 до 72,7 %. Этот метод может быть рекомендован для прививки черенков, заготовленных в период вегетации.

Список использованных источников

1. Проказин, Е. П. Новый метод прививки хвойных для создания семенных участков / Е. П. Проказин // Лес. хоз-во. – 1960. – № 5. – С. 22–28.
2. Кръстев, М. Т. Биологические основы прививки древесных растений при интродукции / М. Т. Кръстев, И. А. Бондорина, С. А. Протас. – М. : Т-во науч. изд. КМК, 2014. – 164 с.
3. Some factors involved in the success of side veneer grafting of *Pinus engelmannii* Carr. / A. Perez-Luna [et al.] // Forests. – 2019. – Vol. 10, N 2. – P. 112–129. <https://doi.org/10.3390/f10020112>
4. Influence of rootstocks and the time of grafting procedure on the efficiency of propagation by grafting two cultivars of mountain pine (*Pinus mugo* Turra) and estimation of chloroplast pigments level in the needles / S. Świerczyński [et al.] // ACTA Scientiarum Polonorum Hortorum Cultus. – 2020. – Vol. 19, N 2. – P. 75–85. <https://doi.org/10.30825/5.ejpau.165.2018.21.4>
5. Impact of external and internal factors on successful grafting of *Pinus pseudostrabus* var. *oaxacana* (Mirov) Harrison / B. R. Rubén [et al.] // Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales Y Del Ambiente. – 2021. – Vol. 27, N 2. – P. 243–256. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2020.05.037>
6. Поплавская, Л. Ф. Способы прививки кедра сибирского / Л. Ф. Поплавская, П. В. Тупик // Устойчивое развитие лесов и рациональное использование лесных ресурсов: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 6–7 дек. 2005 г. ; Мин-во ЛХ РБ, Гос. ком. по науке и технологиям РБ, Белорус. гос. технол. ун-т; редкол. : О. А. Атрощенко [и др.]. – Минск, 2005. – С. 184–186.
7. Effect of irrigation, fertilization and the container on the response to grafting of *Pinus patula* Schltdl. & Cham. seedlings / E. D. López [et al.] // Revista Mexicana de Ciencias Forestales. – 2023. – Vol. 14, N 75. – P. 118–142. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v14i75.1255>
8. Graft survival of *Pinus engelmannii* Carr. in relation to two grafting techniques with dormant and sprouting buds [Электронный ресурс] / A. Pérez-Luna [et al.] // Peer J. – 2021. – Vol. 9. – P. e12182. <https://doi.org/10.7717/peerj.12182>
9. Propagating selected *Pinus monophylla* accessions by grafting to *Pinus edulis* seedling rootstocks / K. M. Lawson [et al.] // Nat. Plants J. – 2021. – Vol. 22, N 3. – P. 293–305. <https://doi.org/10.3368/npj.22.3.293>
10. An agronomic approach to pine nut production by grafting stone pine on two rootstocks [Electronic resource] / M. Guàrdia [et al.] // Agriculture. – 2021. – Vol. 11, N 11. – Art. 1034. <https://doi.org/10.3390/agriculture11111034>
11. Кондратов, Е. В. Влияние возраста привоя на приживаемость и морфометрические параметры однолетних привитых растений спонтанной соматической мутации *Pinus sylvestris* L. / Е. В. Кондратов, В. И. Торчик // Тр. Белорус. гос. технол. ун-та. Сер. 1, Лес. хоз-во, природопол. и перераб. возобновляемых ресурсов. – 2019. – № 2 (222). – С. 109–113.
12. Blada, I. Improvement of grafting procedures for the ornamental species: I. *Picea pungens* Engelm. var. *glauca* Regel / I. Blada, T. Panca // Ann. Forest Res. – 2011. – Vol. 54, N 2. – P. 185–196. <https://doi.org/10.15287/afr.2011.89>
13. Blada, I. Improvement of grafting procedures for the ornamental species: II. *Abies concolor* [(Gold. & Glend.) Lindl.] / I. Blada, T. Panca // Ann. Forest Res. – 2012. – Vol. 55, N 1. – P. 25–31. <https://doi.org/10.15287/afr.2012.72>
14. Торчик, В. И. Биологические основы формирования и использования ассортимента древесных растений для контейнерного озеленения городов Беларуси : автореф. дис. ... д-ра биол. наук : 03.02.01 ; 06.03.03 / В. И. Торчик ; Ин-т эксперим. ботаники им. В. Ф. Купревича НАН Беларуси. – Минск, 2012. – 38 с.
15. Castro-Garibay, S. L. Effective protocol to increase the percentage of grafting success of *Pinus greggii* Engelm. var. *Australia* Donahue et López / S. L. Castro-Garibay [et al.] // Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales Y Del Ambiente. – 2022. – Vol. 28, N 2. – P. 225–240. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2021.03.014>

16. Торчик, В. И. Декоративные сорта хвойных растений Белорусской селекции / В. И. Торчик // Наука и инновации. – 2021. – № 5 (219). – С. 80–83.

17. Методика фенологических наблюдений в ботанических садах СССР / Акад. наук СССР, Совет бот. садов СССР : отв. ред. П. И. Лапин. – М. : ГБС АН СССР, 1975. – 27 с.

References

1. Prokazin E. P. A new method of grafting conifers to create seed plots. *Lesnoe khozyaistvo* [Forestry], 1960, no. 5, pp. 22–28 (in Russian).
2. Kr’stev M. T., Bondorina I. A., Protas S. A. *Biological bases of grafting of woody plants during introduction*. Moscow, Tovarishestvo nauchnykh izdaniy KMK Publ., 2014. 164 p. (in Russian).
3. Perez-Luna A., Prieto-Ruiz J. Á., López-Upton J., Carrillo-Parra A., Wehenkel C., Chávez-Simental J. A., Hernández-Díaz C. Some factors involved in the success of side veneer grafting of *Pinus engelmannii* Carr. *Forests*, 2019, vol. 10, no. 2, pp. 112–129. <https://doi.org/10.3390/f10020112>
4. Świerczyński S., Kolasieński M., Stachowiak A., Rybus-Zajac M. Influence of rootstocks and the time of grafting procedure on the efficiency of propagation by grafting two cultivars of mountain pine (*Pinus mugo* Turra) and estimation of chloroplast pigments level in the needles. *ACTA Scientiarum Polonorum Hortorum Cultus*, 2020, vol. 19, no. 2, pp. 75–85. <https://doi.org/10.30825/5.ejpau.165.2018.21.4>
5. Rubén B. R., Vargas-Hernández J. J., López-Aguillón R., Muñoz-Flores H. J., Treviño-Garza E. J., Aguirre-Calderón O. A. Impact of external and internal factors on successful grafting of *Pinus pseudostrabus* var. *oaxacana* (Mirov) Harrison. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales Y Del Ambiente*, 2021, vol. 27, no. 2, pp. 243–256. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2020.05.037>
6. Poplavskaya L. F., Tupik P. V. Methods for grafting Siberian cedar. *Ustoichivoe razvitie lesov i ratsional’noe ispol’zovanie: materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (Minsk, 06–07 dekabrya 2005 goda)* [Sustainable development of forests and rational use: materials of the International scientific and practical conference (Minsk, December 06–07, 2005)]. Minsk, 2005, pp. 184–186 (in Russian).
7. López E. D., López M. Á., Herrera C. R., Rodríguez M. A. Effect of irrigation, fertilization and the container on the response to grafting of *Pinus patula* Schltdl. & Cham. seedlings. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2023, vol. 14, no. 75, pp. 118–142. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v14i75.1255>
8. Pérez-Luna A., Hernández-Díaz J. C., Wehenkel C., Simental-Rodríguez S. L., Hernández-Velasco J., Prieto-Ruiz J. Á. Graft survival of *Pinus engelmannii* Carr. in relation to two grafting techniques with dormant and sprouting buds. *PeerJ*, 2021, vol. 9, p. e12182. <https://doi.org/10.7717/peerj.12182>
9. Lawson K. M., Rupp L. A., Sun Y., Newhall R., Reid C. Propagating selected *Pinus monophylla* accessions by grafting to *Pinus edulis* seedling rootstocks. *Native Plants Journal*, 2021, vol. 22, no. 3, pp. 293–305. <https://doi.org/10.3368/npj.22.3.293>
10. Guàrdia M., Teixidó A., Sanchez-Bragado R., Aletà N. An agronomic approach to pine nut production by grafting stone pine on two rootstocks. *Agriculture*, 2021, vol. 11, no. 11, art. 1034. <https://doi.org/10.3390/agriculture11111034>
11. Kondratov E. V., Torchik V. I. Influence of graft age on survival rate and morphometric parameters of one-year-old grafted plants of spontaneous somatic mutation *Pinus sylvestris* L. *Trudy Belorusskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya 1, Lesnoe khozyaistvo, prirodopoll’zovanie i pererabotka vozobnovlyaemykh resursov* [Proceedings of the Belarusian State Technological University. Series 1, Forestry, Resource Management and Processing of Renewable Resources], 2019, no. 2 (222), pp. 109–113 (in Russian).
12. Blada I., Panea T. Improvement of grafting procedures for the ornamental species: I. *Picea pungens* Engelm. var. *glauca* Regel. *Annals of Forest Research*, 2011, vol. 54, no. 2, pp. 185–196. <https://doi.org/10.15287/afr.2011.89>
13. Blada I., Panea T. Improvement of grafting procedures for the ornamental species: II. *Abies concolor* [(Gold. & Glend.) Lindl.]. *Annals of Forest Research*, 2012, vol. 55, no. 1, pp. 25–31. <https://doi.org/10.15287/afr.2012.72>
14. Torchik V. I. *Biological bases for the formation and use of an assortment of woody plants for container gardening of Belarusian cities*. Abstract of Ph. D. diss. Minsk, 2012. 38 p.
15. Castro-Garibay S. L., Villegas-Monter Á., López-Upton J., Sandoval-Villa M., Arévalo-Galarza L. Effective protocol to increase the percentage of grafting success of *Pinus greggii* Engelm. var. *Australia* Donahue et López. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales Y Del Ambiente*, 2022, vol. 28, no. 2, pp. 225–240. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2021.03.014>
16. Torchik V. I. *Decorative varieties of coniferous plants of the Belarusian selection*. *Nauka i innovatsii* [Science and innovation], 2021, no. 5 (219), pp. 80–83 (in Russian).
17. Lapin P. I. (ed.). *The methodology of phenological observations in the botanical gardens of the USSR*. Moscow, Main Botanical Garden of the USSR Academy of Sciences, 1975. 27 p. (in Russian).

Информация об авторах

Кондратов Евгений Валерьевич – канд. биол. наук, ст. науч. сотрудник. Центральный ботанический сад НАН Беларуси (ул. Сурганова, 2в, 220012, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: kondratov.20144@mail.ru

Торчик Владимир Иванович – член-корреспондент, д-р биол. наук, профессор, заведующий лабораторией. Центральный ботанический сад НАН Беларуси (ул. Сурганова, 2в, 220012, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: dendro@tut.by

Information about the authors

Yauhen V. Kondratau – Ph. D. (Biol.), Senior Researcher. Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus (2v, Surganov Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kondratov.20144@mail.ru

Uladzimir I. Torchyk – Corresponding Member, D. Sc. (Biol.), 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: dendro@tut.by

ISSN 1029-8940 (Print)
ISSN 2524-230X (Online)
УДК 581.17:620.3
<https://doi.org/10.29235/1029-8940-2023-68-4-332-344>

Поступила в редакцию 07.09.2022
Received 07.09.2022

А. С. Курнушко¹, Т. А. Скуратович¹, Ю. Н. Бекиш², С. Г. Азизбекян², О. В. Молчан¹

¹Институт экспериментальной ботаники им. В. Ф. Купревича НАН Беларуси,
Минск, Республика Беларусь

²Институт физико-органической химии НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

ВЛИЯНИЕ СОЛЕЙ И НАНОЧАСТИЦ СЕЛЕНА И КРЕМНИЯ НА РОСТ МИЦЕЛИЯ *FUSARIUM AVENACEUM* (FR.) SACC. И *BIPOLARIS SOROKINIANA* (SACC.) SHOEM. И ПРОРАСТАНИЕ СЕМЯН ЗЛАКОВЫХ КУЛЬТУР

Аннотация. Изучено влияние селена и кремния в наноформе в сравнении с селенитом натрия и натрием кремнефтористым на рост мицелия патогенных грибов *Fusarium avenaceum* и *Bipolaris sorokiniana*, а также на прорастание семян и рост проростков пшеницы и кукурузы. Выявлен ингибирующий эффект наночастиц на рост *Bipolaris sorokiniana* и *Fusarium avenaceum*. Нанокремний в концентрации 5–50 мг/л в большей степени, чем наночастицы селена, ингибировал рост *Fusarium avenaceum* и *Bipolaris sorokiniana* и был более эффективен, чем натрий кремнефтористый. *Fusarium avenaceum* оказался более устойчивым к наноселену и селениту натрия по сравнению с *Bipolaris sorokiniana*. Наночастицы практически не влияли на прорастание семян и рост проростков пшеницы и кукурузы, в то время как селенит натрия и натрий кремнефтористый в таких же концентрациях вызывали снижение энергии прорастания семян и сухой массы побегов и корней проростков.

Ключевые слова: наноселен, нанокремний, селенит натрия, натрий кремнефтористый, *Fusarium avenaceum*, *Bipolaris sorokiniana*, пшеница (*Triticum aestivum* L.), кукуруза (*Zea mays* L.), биометрические показатели, фунгицидная активность

Для цитирования: Влияние солей и наночастиц селена и кремния на рост мицелия *Fusarium avenaceum* (Fr.) Sacc. и *Bipolaris sorokiniana* (Sacc.) Shoem. и прорастание семян злаковых культур / А. С. Курнушко [др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. биол. наук. – 2023. – Т. 68, № 4. – С. 332–344. <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2023-68-4-332-344>

Anna S. Kurnushko¹, Tatiana A. Skuratovich¹, Yuliya N. Bekish², Siarhei G. Azizbekyan², Olga V. Molchan¹

¹V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Republic of Belarus

²Institute of Physical and Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

INFLUENCE OF SELENIUM AND SILICON SALTS AND NANOPARTICLES ON THE GROWTH OF *FUSARIUM AVENACEUM* (FR.) SACC. AND *BIPOLARIS SOROKINIANA* (SACC.) SHOEM. MYCELIUM AND GRAIN SEEDS GERMINATION

Abstract. The effect of selenium and silicon in nanoform in comparison with sodium selenite and sodium silicofluoride on the growth of pathogenic fungi *Fusarium avenaceum* and *Bipolaris sorokiniana* was evaluated. The influence of nanoparticles on wheat and corn seed germination and seedling growth was also studied. The inhibitory effect of selenium and silicon nanoparticles on the growth of *Fusarium avenaceum* and *Bipolaris sorokiniana* was revealed. Nanosilicon at a concentration of 5–50 mg/l inhibited the growth of pathogenic fungi *Fusarium avenaceum* and *Bipolaris sorokiniana* to a greater extent than selenium nanoparticles and was more effective than sodium silicofluoride. *Fusarium avenaceum* was shown to be more resistant to nanoselenium and sodium selenite compared to *Bipolaris sorokiniana*. Nanoparticles had practically no effect on seed germination and the growth of wheat and corn seedlings, while sodium selenite and sodium silicofluoride at the same concentrations caused a decrease in seed germination energy and dry weight of the shoots and roots of seedlings.

Keywords: selenium nanoparticles, silicon nanoparticles, sodium selenite, sodium cream-nonfluoride, *Fusarium avenaceum*, *Bipolaris sorokiniana*, wheat (*Triticum aestivum* L.), corn (*Zea mays* L.), biometric indicators, fungicidal activity

For citation: Kurnushko A. S., Skuratovich T. A., Bekish Y. N., Azizbekyan S. G., Molchan O. V. Influence of selenium and silicon salts and nanoparticles on the growth of *Fusarium avenaceum* (Fr.) Sacc. and *Bipolaris sorokiniana* (Sacc.) Shoem. mycelium and grain seeds germination. *Vesti Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya biyalagichnykh navuk* = *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological series*, 2023, vol. 68, no. 4, pp. 332–344 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2023-68-4-332-344>

Введение. Потери урожая в результате воздействия биотических стрессоров, вызывающих различные заболевания растений, по некоторым оценкам, до сих пор достаточно велики и составляют от 20 до 40 % [1]. Одной из самых распространенных болезней зерновых культур является фузариоз, вызываемый грибами рода *Fusarium*, особенно *Fusarium graminearum*, *Fusarium culmorum* и *Fusarium avenaceum* [2]. Опасным возбудителем болезней злаковых культур являются грибы рода *Bipolaris*. Повсеместно распространена гельминтоспориозная корневая гниль (*Bipolaris sorokiniana*), поражающая озимую и яровую пшеницу, рожь, ячмень, злаковые травы [3]. Для защиты растений от грибковых заболеваний используют различные фунгициды, часто являющиеся токсичными для человека, животных, рыб и зоопланктона. При этом растущая потребность человечества в продуктах растениеводства и формирование устойчивости патогенов к применяемым препаратам приводит к увеличению потребления химикатов в сельском хозяйстве [4]. Это вызывает ухудшение состояния почв, загрязнение окружающей среды и попадание в пищу человека и животных все большего количества ксенобиотиков. Поэтому большие надежды возлагают на нанотехнологические подходы к созданию и улучшению свойств систем защиты растений, позволяющие разработать рентабельные, высокоэффективные и экологически безопасные пестициды. В частности, большое внимание уделяется вопросу о влиянии наночастиц на физиологические и биохимические процессы и устойчивость растений к патогенам [5]. У многих препаратов, содержащих наночастицы, выявлена высокая фунгицидная и/или бактерицидная активность.

Особый интерес представляют содержащие селен и кремний наночастицы, которые во многих случаях демонстрируют свою эффективность, повышая устойчивость растений к абиотическим и биотическим стрессорам [6, 7]. В ряде исследований установлено, что наночастицы селена обладают бактерицидным и бактериостатическим эффектом [6]. В работе [8] показано, что наноселен более эффективен для повышения активности селенозависимых антиоксидантных ферментов и менее токсичен для растений, чем селен в солевой форме. Кремний, хотя и не является критически необходимым элементом, также играет важную роль в защите растений от абиотических и биотических стрессоров [7]. Известно, что кремний, в том числе и в наночастицах, может ослаблять стресс, вызываемый у сельскохозяйственных культур тяжелыми металлами, а также снижать заболеваемость, вызываемую *Magnaporthe grisea*, *Cochliobolus miyabeanus*, *Thanatephorus cucumeris*, *Monographella albescens*, различными видами родов *Fusarium*, *Bipolaris* и другими патогенами [7, 9]. Выявлено влияние кремния на фотосинтетические реакции листьев ячменя, зараженных *Bipolaris sorokiniana* [10]. Кроме того, кремний придает растениям механическую прочность, укрепляет клеточные стенки, обеспечивая повышение устойчивости растений. В оптимальных дозах кремний способствует лучшему обмену азота и фосфора в тканях, стимулирует потребление бора и ряда других элементов, обеспечивает снижение токсичности избыточных количеств тяжелых металлов [11]. Нанотехнологии также открывают большие перспективы для целевой доставки биомолекул и агрохимикатов, включая фунгициды, что повышает эффективность и безопасность борьбы с болезнями растений и позволяет сократить или свести к минимуму неизбежное использование обычных химических пестицидов [9].

Таким образом, использование наночастиц селена и кремния может быть эффективным в комплексных системах борьбы с биотическими стрессорами, позволит сократить применение фунгицидов и повысить устойчивость растений к атакам патогенов и различным заболеваниям. Одним из направлений может быть их применение в качестве защитных препаратов фунгицидного действия. Однако к настоящему времени работ, свидетельствующих о фунгицидном или фунгистатическом действии наноселена и нанокремния, крайне мало [5]. Следует также отметить, что эффективность воздействия наночастиц, в том числе селена и кремния, зависит от их физико-химических характеристик, особенно от структуры, размера, концентрации используемых частиц, а также от вида и физиологического состояния растения [5, 12]. При этом важно, чтобы наночастицы, обладая фунгицидной активностью, в используемой концентрации не были токсичными для растений.

Цель настоящей работы – оценка влияния солей и наночастиц селена и кремния на рост мицелия *Fusarium avenaceum* и *Bipolaris sorokiniana*, а также на прорастание семян и рост проростков пшеницы и кукурузы.

Объекты и методы исследования. В работе использовали штаммы *Fusarium avenaceum* (Fr.) Sacc. MSK-F 44C из гербария Института экспериментальной ботаники НАН Беларуси и *Bipolaris sorokiniana* (Sacc.) Shoem. БИМ-464 из Белорусской коллекции непатогенных микроорганизмов Института микробиологии НАН Беларуси [13, 14].

Определение фунгицидной активности проводили, используя метод агаровых блоков. Культуры выращивали в чашках Петри на агаризованной среде Чапека. После образования мицелием сплошного газона на поверхности питательной среды стерильным сверлом вырезали агаровые блоки, которые переносили на другую плотную питательную среду. В чашки со средой Чапека перед застыванием добавляли селен или кремний в наноформе или в форме солей. Чашки инкубировали в термостате 5 сут при 25 °С, после чего измеряли диаметр зоны роста мицелия [15].

В качестве растительных объектов использовали проростки яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сорта Дарья, предоставленные НПЦ НАН Беларуси по земледелию, и кукурузы (*Zea mays* L.) сорта Порумбень (ОАО «МинскСортСемОвощ», Беларусь). Семена пшеницы стерилизовали в течение 30 с в 70 %-ном C_2H_5OH (этанол), кукурузы – в течение 5 мин в 25 %-ном растворе H_2O_2 (перекиси водорода), затем многократно промывали дистиллированной водой. Определяли энергию прорастания семян, сухую массу надземной части и корней проростков [16].

В качестве солевых форм элементов использовали Na_2SeO_3 (селенит натрия), ч, ТУ 6-09-17-209-88 и Na_2SiF_6 (водный раствор натрия кремнефтористого, $Si = 1 \text{ мг/см}^3$; ГСО 8212-2002) производства ЭАА «Эко-аналитик» (Минск, Беларусь).

Наночастицы селена синтезировали в НТООО «АКТЕХ» (Минск, Беларусь). В качестве источника наночастиц кремния использовали золь кремниевой кислоты марки Ковелос производства ООО «Экокремний» (Россия) в виде коллоидного раствора мицелл аморфного кремнезема (SiO_2) в воде. Размеры наночастиц (гидродинамические радиусы) определяли с помощью метода динамического рассеяния света на лазерном анализаторе Zetasizer Nano ZSP (Malvern, Великобритания) при разбавлении растворов деионизованной водой в различных соотношениях – от 1 : 10 до 1 : 1000. Массовые доли селена и кремния в растворах исследуемых образцов определяли на атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно-связанной плазмой VISTA PRO (Varian, США).

Для статистической обработки данных использовали программу Excel. Эксперименты проводили в трехкратной повторности. Данные на гистограммах представлены в виде средних арифметических значений со стандартным отклонением [17]. Однофакторный дисперсионный анализ применяли для оценки достоверности отличий от контроля.

Результаты и их обсуждение. Используемые в работе наночастицы селена, синтезированные в виде нерастворимых соединений в оболочке из биогенных полимеров [18], являются компонентом одной из марок микроудобрений серии Наноплант, разработанных в НАН Беларуси и освоенных в массовом производстве в НТООО «АКТЕХ» [19, 20]. Токсичность микроудобрения Наноплант исследовали согласно Европейской процедуре оценки острой, кумулятивной, фито-, эко-, цитотоксичности, мутагенности на мышах, кроликах, растениях, моллюсках и одноклеточных организмах [21–23]. В результате многолетних исследований установлено, что данное микроудобрение является менее токсичным, чем соли соответствующих микроэлементов, и, согласно классификации опасности химических веществ (продукции, материалов) по воздействию на организм, может быть отнесено к IV классу опасности (вещества малоопасные) [24].

На рис. 1 представлены гистограммы распределения частиц селена и кремния по размерам. Оба образца характеризуются достаточно высокой полидисперсностью (распределение от 15 до 70 нм для Se и от 7 до 12 нм для SiO_2), средние размеры наночастиц составляют 10 нм для SiO_2 и 38 нм для Se.

Прежде всего было изучено действие наночастиц селена и кремния, а также селенита натрия и натрия кремнефтористого на рост мицелия *Fusarium avenaceum* и *Bipolaris sorokiniana* (рис. 2, 3). В результате обнаружено, что селен в наноформе при его концентрации в диапазоне 5–50 мг/л не оказывал достоверного влияния на рост *Fusarium avenaceum*, хотя и отмечалась тенденция к снижению диаметра зоны роста мицелия при повышении концентрации наночастиц (рис. 2, 3). Селенит натрия только при концентрации селена в среде 50 мг/л снижал интенсивность разрас-

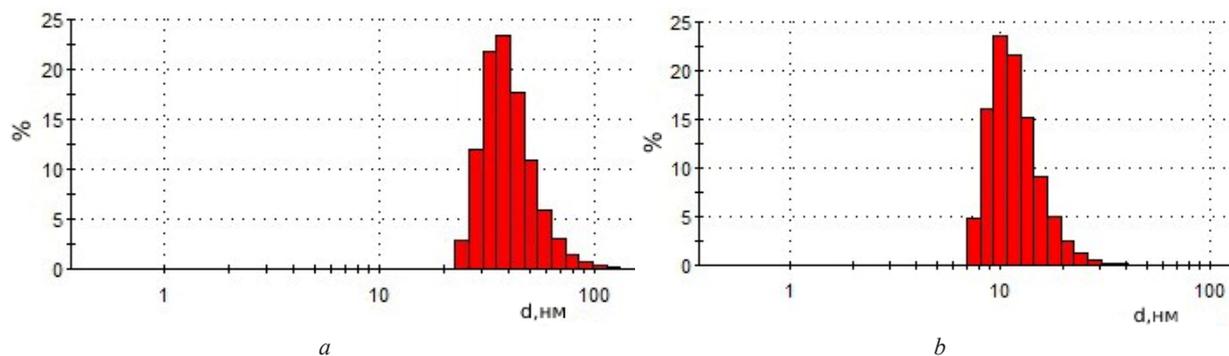


Рис. 1. Размеры наночастиц селена (a) и кремния (b)

Fig. 1. Sizes of selenium (a) and silicon (b) nanoparticles

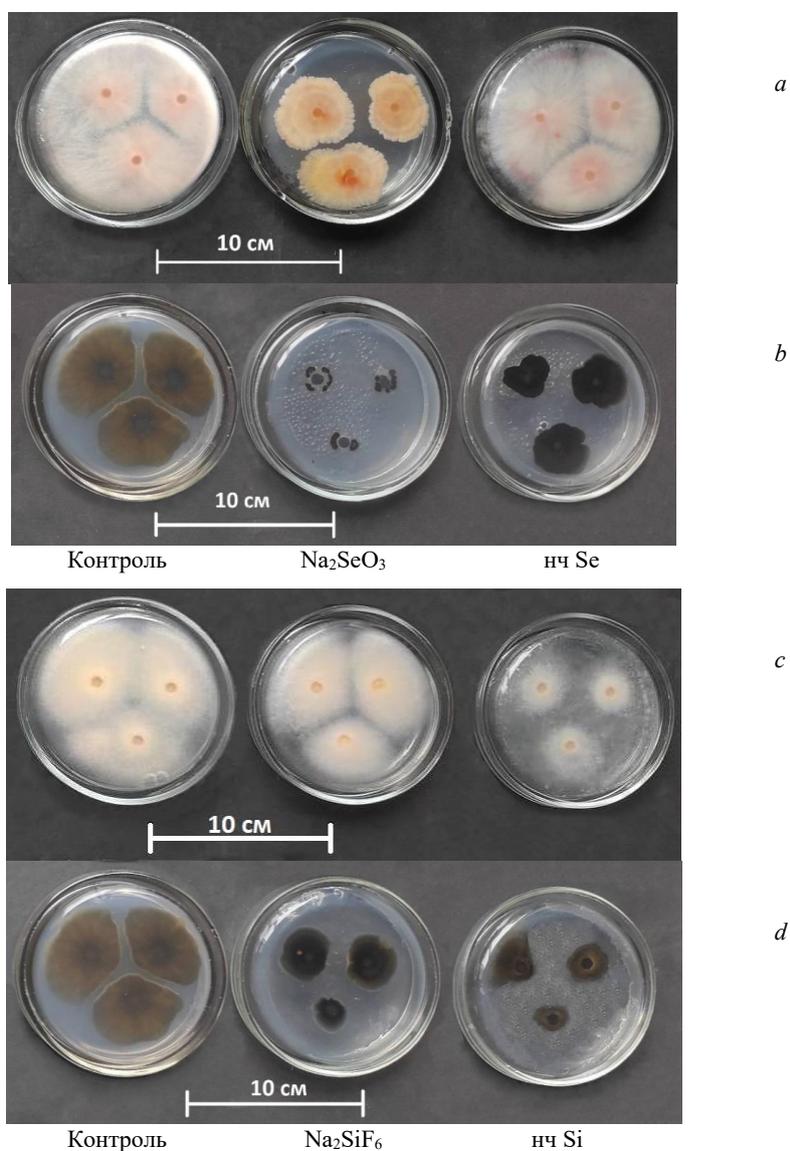


Рис. 2. Влияние солевой и наночастиц селена и кремния на рост мицелия *Fusarium avenaceum* (a, c) и *Bipolaris sorokiniana* (b, d) на 7-е сутки (50 мг/л в пересчете на селен или кремний)

Fig. 2. Effect of saline and nanoforms of selenium and silicon on the *Fusarium avenaceum* (a, c) and *Bipolaris sorokiniana* (b, d) mycelium growth on the 7th day (50 mg/l per selenium or silicon)

тания мицелия *Fusarium avenaceum* на 10–20 % (рис. 3, а). Действие нано- и солевой формы селена на рост *Bipolaris sorokiniana* являлось более выраженным: ингибирующее действие наночастиц и натрий селенита проявлялось при концентрациях селена 25–50 и 5–50 мг/л соответственно (рис. 3, б). Добавление в среду наноселена в концентрации 50 мг/л приводило к уменьшению диаметра зоны роста мицелия *Bipolaris sorokiniana* на 30–40 % (рис. 2, б). В работе Saadony с соавт. (2021) также было показано, что наночастицы селена (Che-SeNPs и BioSeNPs) оказались достаточно эффективны против некоторых видов грибов рода *Fusarium*, рост которых был значительно снижен при использовании Che-SeNPs в диапазоне концентраций 25–45 мкг/мл и BioSeNPs в диапазоне 20–40 мкг/мл [25]. В этом же исследовании отмечены различия в эффективности действия наночастиц, полученных разными способами.

Кроме того, наночастицы характеризуются отличными от ионных форм механизмами поступления, транспорта, накопления и воздействия на физиологические и биохимические процессы в живых организмах. Эти механизмы до сих пор слабо изучены, однако хорошо известно, что

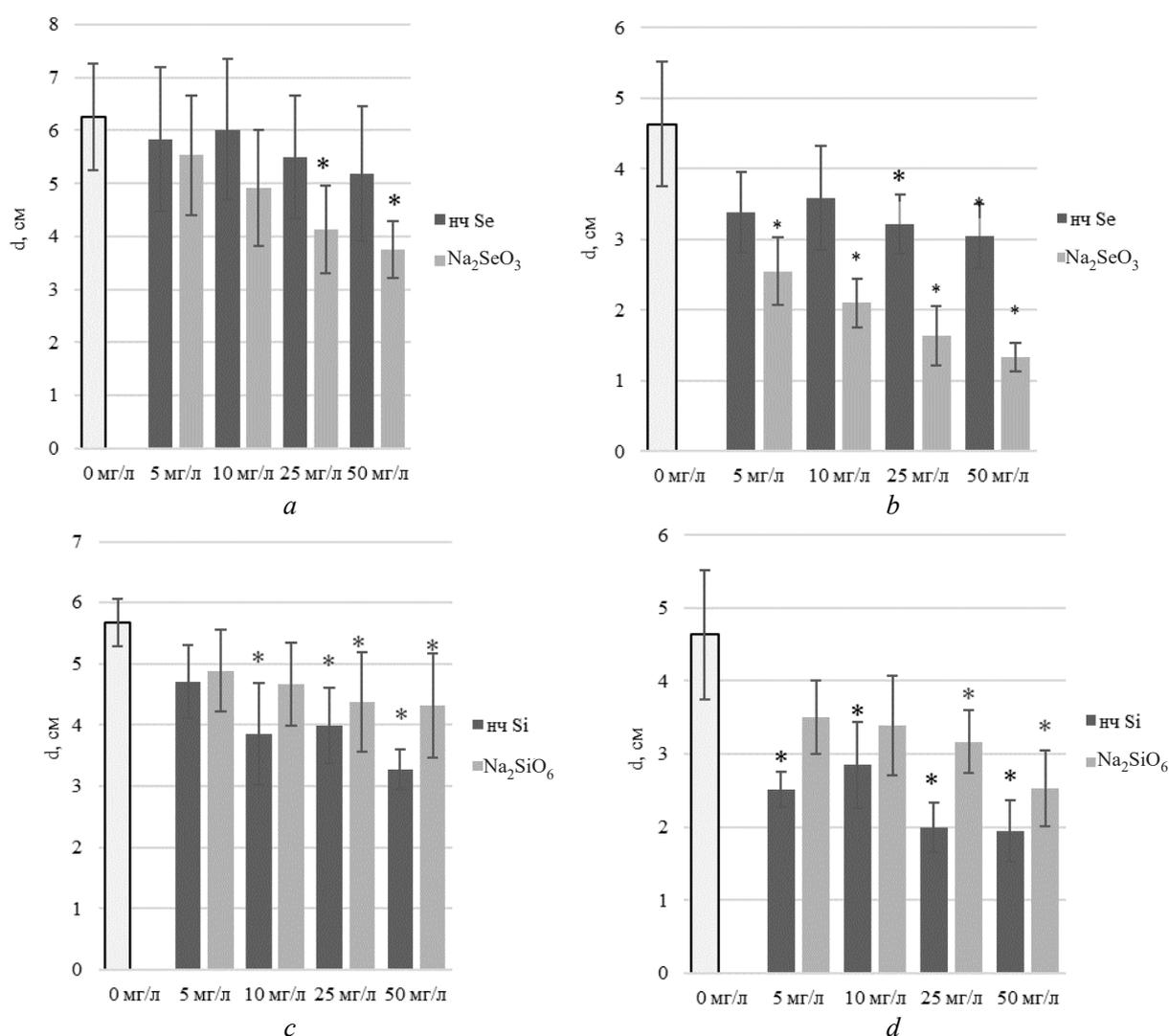


Рис. 3. Влияние солевой и наноформ селена и кремния на рост мицелия *Fusarium avenaceum* (а, с) и *Bipolaris sorokiniana* (б, д) на 7-е сутки (5–50 мг/л в пересчете на селен или кремний).

* – достоверные отличия от контроля ($p < 0,05$)

Fig. 3. Effects of saline and nanoforms of selenium and silicon on the *Fusarium avenaceum* (a, c) and *Bipolaris sorokiniana* (b, d) mycelium growth on the 7th day (5–50 mg/l per selenium or silicon).

* – significant differences from the control ($p < 0.05$)

эффектыўнасць наночастиц залежыць ад іх фізіка-хімічных свайстваў, канцэнтрацыі і фізіялагічнага становішча клеткі ці арганізма-мішні [5].

Інтарэсна адзначыць, што наночастицы крэмнія ў большай ступені, чым наночастицы селена, інгібіравалі рост патогенных грыбоў абодвух відаў і былі сярнімы па дзеянню ці нават больш эфектыўны, чым водны раствор натрыя крэмнефторыстага (рис. 2, 3). Крэмній у наноформе ў дыяпазоне канцэнтрацый 10–50 мг/л оказывал інгібіруючае дзеянне на рост міцелія *Fusarium avenaceum*, а пры канцэнтрацыі 5–50 мг/л зніжаў інтэнсіўнасць росту *Bipolaris sorokiniana*. Пры гэтым дыяметр зоны росту міцелія *Fusarium avenaceum* зніжаўся ў сярэднім на 20–45 %, а *Bipolaris sorokiniana* – на 50–60 %. Натрыў крэмнефторысты інгібіраваў рост міцелія *Fusarium avenaceum* і *Bipolaris sorokiniana* пры 25 і 50 мг/л крэмнія. У літаратуры раней ужо была паказана фунгіцыдная актывнасць крэмнійсодержащих наночастиц. Так, напрыклад, даследаванне Kalboush с саавт. (2017) такжэ паказала эфектыўнасць ўплывання наночастиц крэм-

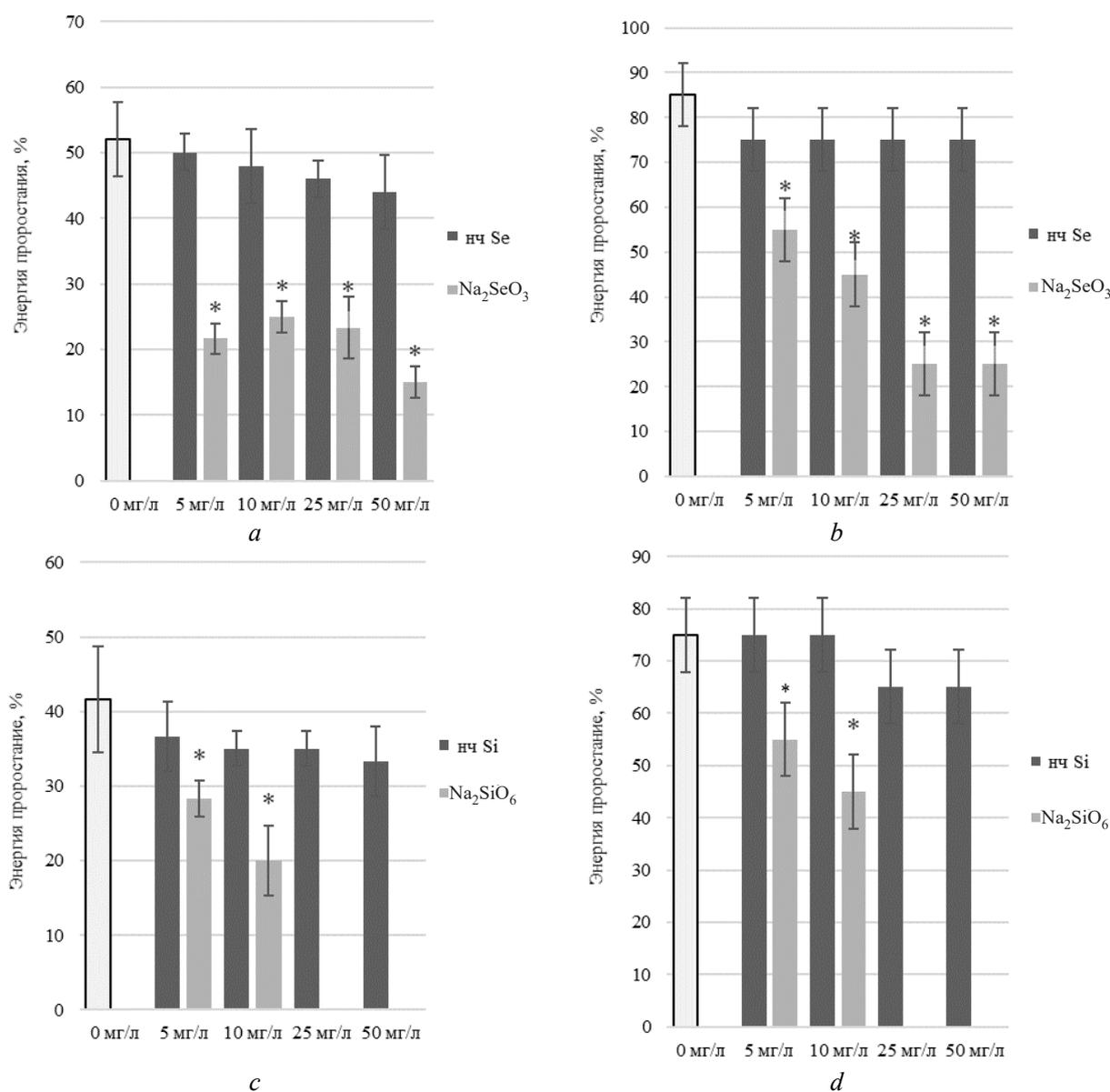


Рис. 4. Влияние солевой и наноформ селена и кремния на энергию прорастания семян пшеницы (a, c) и кукурузы (b, d) (5–50 мг/л в пересчете на селен или кремний). * – достоверные отличия от контроля ($p < 0,05$)

Fig. 4. Effects of saline and nanoforms of selenium and silicon on the germination energy of wheat (a, c) and corn (b, d) seeds (5–50 mg/l per selenium or silicon). * – significant differences from the control ($p < 0.05$)

незема в борьбе с грибковыми заболеваниями риса *Pyricularia grisea* и *Bipolaris oryzae* в условиях защищенного грунта [26].

С другой стороны, всегда важно, чтобы при выраженной фунгицидной активности используемых наночастиц они не оказывали угнетающего действия на растения. Поэтому была проведена оценка влияния наночастиц в тестируемых концентрациях селена и кремния на прорастание семян и рост проростков пшеницы и кукурузы. В результате было обнаружено, что наночастицы, в отличие от солевых форм, не оказывали достоверного влияния на прорастание семян обеих злаковых культур (рис. 4). Так, и селенит натрия, и натрий кремнефтористый значительно снижали энергию прорастания семян обеих злаковых культур, а при обработке натрием кремнефтористым при концентрации кремния 25 и 50 мг/л семена и вовсе не проросли (рис. 4). Некоторые исследователи ранее отмечали, что предварительное замачивание в растворах, содержащих нанокремний в концентрациях 12, 24 и 36 мг/л, вызывало незначительную стимуляцию прорастания семян подсолнуха, в то время как высокие концентрации заметно подавляли прорастание [14]. В другой работе наночастицы диоксида кремния размером 10–15 нм и в концентрации до 100 мг/л не оказывали значительного влияния на семена и проростки овса, а энергия прорастания семян в присутствии более мелких наночастиц незначительно уменьшалась отно-

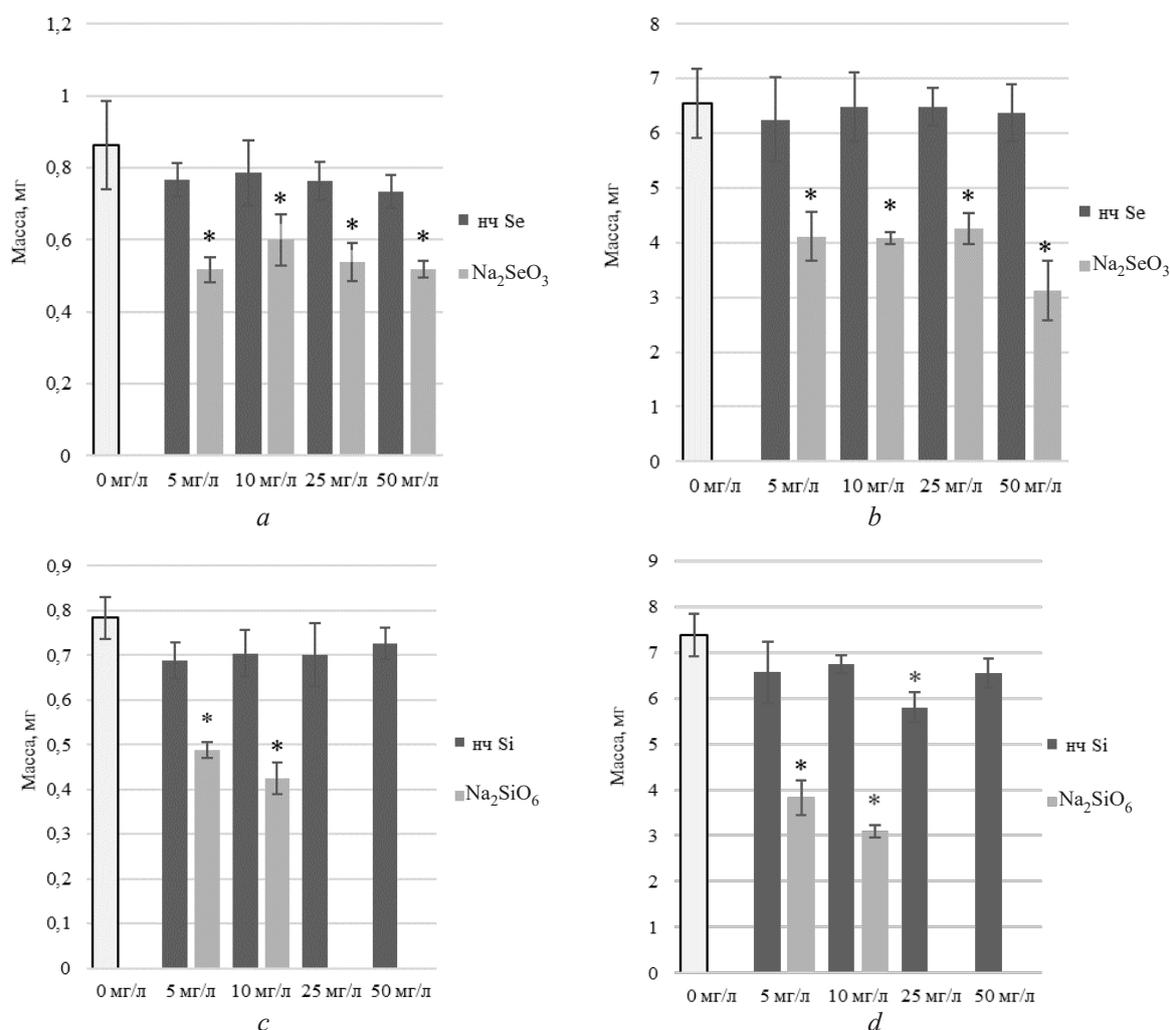


Рис. 5. Влияние солевой и наночастиц селена и кремния на накопление сухой массы надземной части 3-дневного проростка пшеницы (a, c) и кукурузы (b, d) (5–50 мг/л в пересчете на селен или кремний).

* – достоверные отличия от контроля ($p < 0.05$)

Fig. 5. Effects of saline and nanoforms of selenium and silicon on the dry mass of the aboveground part of 3-day wheat (a, c) and corn (b, d) seedlings (5–50 mg/l per selenium or silicon). * – significant differences from the control ($p < 0.05$)

сительно контроля [27]. Таким образом, отсутствие эффекта влияния наночастиц на прорастание семян, по-видимому, свидетельствует о том, что тестируемые наночастицы селена и кремния не являются токсичными для семян злаковых культур.

В нашем исследовании наночастицы селена и кремния не оказывали такого значительного действия, как солевые формы, на прирост массы проростков пшеницы и кукурузы. Только в концентрации 25 мг/л наночастицы кремния вызвали снижение сухой массы побега проростка кукурузы на 5–10 %, а под действием 10 и 25 мг/л наночастиц селена сухая масса корня проростка пшеницы несколько отличалась от контроля (рис. 5, 6). Данный результат закономерен, поскольку наночастицы селена, использованные в работе, синтезированы в оболочке из биогенных полимеров, и их низкая токсичность для растений была ожидаема. В работе Нурминского с соавт. (2020) также не выявлено влияния нанокompозитов селена на массу побега и корня 5-дневных проростков редиса [28].

Хорошо известно, что оказываемый действием наночастиц эффект обусловлен их структурой и концентрацией. Поэтому при других, часто более низких, концентрациях и/или режимах использования положительный биологический эффект наночастиц селена вполне может проявиться, как это показано Кузовковой с соавт. (2013) при изучении влияния наноселена на клеточные культуры многоколосника морщинистого [29]. Кроме того, как упомянуто ранее, наноча-

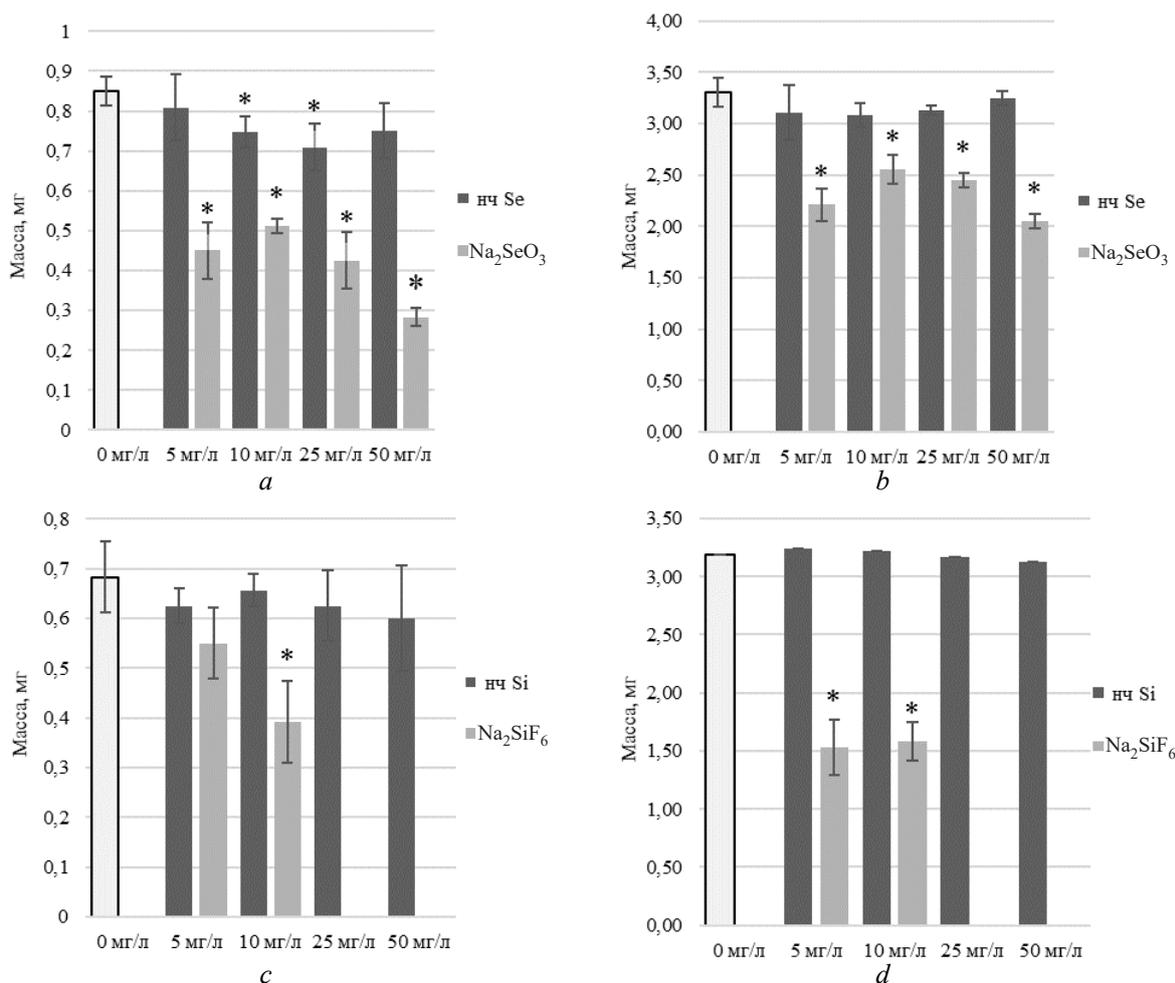


Рис. 6. Влияние солевой и наночастиц селена и кремния на накопление сухой массы корня 3-дневного проростка пшеницы (a, c) и кукурузы (b, d) (наночастицы селена и кремния, Na₂SeO₃, Na₂SiF₆ в концентрации 50 мг/л в пересчете на элемент). * – достоверные отличия от контроля ($p < 0,05$)

Fig. 6. Effects of saline and nanoforms of selenium and silicon on the dry root mass of 3-day wheat (a, c) and corn (b, d) seedlings (selenium and silicon nanoparticles, Na₂SeO₃, Na₂SiF₆ at a concentration of 50 mg/l per element). * – significant differences from the control ($p < 0.05$)

стицы селена входят в состав комплексного препарата Наноплант, широко применяемого в качестве микроудобрения с доказанной эффективностью [18, 30]. Более 10 марок Нанопланта на основе наночастиц с различным сочетанием элементов Ca, B, Co, Mn, Cu, Fe, Zn, Cr, Se, Mo, S зарегистрированы и испытаны на многих выращиваемых в Беларуси культурах [18].

Наши результаты не противоречат работам других авторов, в большинстве из которых показано, что наночастицы кремния могут либо способствовать росту растений при определенных концентрациях и режимах использования, либо не оказывают никакого влияния, проявляя эффективность только в стрессовых условиях [31]. Например, исследования Faride с соавт. (2018) показали, что наночастицы кремния, как и силикат натрия, стимулировали рост проростков овса, но при этом вызывали уменьшение длины корня [12]. В статье Tereshchenko с соавт. (2017) наночастицы оксида кремния оказывали стимулирующее действие на площадь листовой пластинки и сухую массу растений в концентрациях $1,5 \cdot 10^{-5}$, $3 \cdot 10^{-5}$ и $3 \cdot 10^{-4}$ % [32]. Это, по мнению авторов, косвенно свидетельствовало о том, что растения быстрее проходили фенологические стадии под влиянием наночастиц оксида кремния. Как видно, авторы этой публикации использовали достаточно низкие концентрации наночастиц. В нашей работе в качестве источника наночастиц кремния использован золь кремниевой кислоты в виде коллоидного раствора мицелл аморфного кремнезема (SiO_2) в воде. В ряде работ также утверждается, что наночастицы кремнезоля стимулируют рост и развитие овощных и зерновых культур, а также посадочного материала в технологии клонального микроразмножения [33, 34]. В зависимости от размера, концентрации и способа использования наночастицы, в том числе селена и кремния, могут вызывать положительные или отрицательные эффекты на живые организмы [5].

Важно отметить, что селенит натрия при таких же концентрациях селена, как и в наночастицах, снижал сухую массу надземной части на 40–50 %, корня – на 65–70 % (рис. 5, 6). Это согласуется с работой El-Badri с соавт. (2022), в которой было показано, что после 7-дневного воздействия селенит натрия (0,26 мг/л) уменьшал длину побега и корня на 7,85 и 67,47 % соответственно по сравнению с контролем [35]. Похожие эффекты приведены и в других работах [8, 35]. Хорошо известно, что в определенных концентрациях селен может оказывать стимулирующее действие на ряд регуляторных функций в растениях, а в повышенных концентрациях является токсичным. Кремнефтористый натрий также оказывал негативное действие на проростки: при его высоких концентрациях отмечалась гибель растений (рис. 5, 6). Возможно, это связано с тем, что фтор ингибирует активность ферментов и является токсичным, повреждая клеточные мембраны [36, 37].

Заключение. Таким образом, изучено действие селена и кремния в наноформе в сравнении с селенитом натрия и натрием кремнефтористым на рост мицелия патогенных грибов *Fusarium avenaceum* и *Bipolaris sorokiniana*, а также на прорастание семян и рост проростков пшеницы и кукурузы. Установлено, что *Fusarium avenaceum* является более устойчивым к действию селена в наноформе по сравнению с *Bipolaris sorokiniana*. Показано ингибирующее действие наноселена в концентрациях 25 и 50 мг/л на рост *Bipolaris sorokiniana* и отсутствие эффектов по отношению к *Fusarium avenaceum*. Нанокремний в концентрации 5–50 мг/л в большей степени, чем наноселен, ингибирует рост патогенных грибов *Fusarium avenaceum* и *Bipolaris sorokiniana* и более эффективен, чем натрий кремнефтористый. Исследуемые наноформы селена и кремния не являются токсичными по отношению к семенам и проросткам пшеницы и кукурузы. Полученные результаты позволяют рассматривать наночастицы селена и кремния в качестве компонентов противогрибковых препаратов или носителей для целевой доставки фунгицидов и оздоровления культурных растений.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований согласно договорам № Б20М-044 и № Б22УЗБ-053.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Института микробиологии НАН Беларуси, гербария Института экспериментальной ботаники, НПЦ НАН Беларуси по земледелию за предоставленные для работы материалы.

Acknowledgements. The work was carried out with the support of the Belarusian Republican Foundation for Basic Research in accordance with the agreements No. B20M-044 and No. B22UZB-053.

The authors are grateful to the staff of the Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus, the Herbarium of the Institute of Experimental Botany, the Scientific Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus for the materials provided for the work.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Crop losses due to diseases and their implications for global food production losses and food security / S. A. Savary [et al.] // *Food Security*. – 2012. – Vol. 4, N 11. – P. 519–537. <https://doi.org/10.1007/s12571-012-0200-5>
2. Management of *Fusarium* head blight of wheat and barley / N. W. Stephen [et al.] // *Crop Protection*. – 2015. – Vol. 73, N 8. – P. 100–107. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2015.02.025>
3. Овсянкина, А. В. Корневые гнили зерновых / А. В. Овсянкина // Теория и практика борьбы с паразитарными болезнями. – 2012. – № 13. – С. 300–303.
4. Particularities of fungicides and factors affecting their fate and removal efficacy: A review / G. D. Gikas [et al.] // *Sustainability*. – 2022. – Vol. 14, N 7. – P. 1050–1073. <https://doi.org/10.3390/su14074056>
5. Wu, H. Recent advances in nano-enabled agriculture for improving plant performance / H. Wu, Z. Li // *Crop*. – 2022. – Vol. 10, N 1. – P. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2021.06.002>
6. Воздействие наноразмерного селена на возбудитель кольцевой гнили и картофель *in vitro* / И. А. Граскова [и др.] // *Химия раст. сырья*. – 2019. – № 3. – С. 345–354.
7. Datnoff, L. E. The use of silicon for integrated disease management: reducing fungicide applications and enhancing host plant resistance / L. E. Datnoff, K. W. Seebold, F. J. Correa-V // *Studies Plant Sci*. – 2001. – Vol. 8, N 1. – P. 171–184.
8. Wang, H. Elemental selenium at nano size possesses lower toxicity without compromising the fundamental effect on selenoenzymes: comparison with selenomethionine in mice / H. Wang, J. Zhang, H. Yu // *Free Radic. Biol. Med*. – 2007. – Vol. 42, N 10. – P. 1524–1533. <https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2007.02.013>
9. Smart pH responsive system based on hybrid mesoporous silica nanoparticles for delivery of fungicide to control *Fusarium* crown and root rot in tomato / M. A. Mosa [et al.] // *Plant Pathol*. – 2022. – Vol. 104, N 7. – P. 979–992. <https://doi.org/10.1007/s42161-022-01122-1>
10. Effect of silicon and fungicide on photosynthetic responses in barley leaves challenged by *Bipolaris sorokiniana* / T. M. Holz [et al.] // *Physiol. Mol. Plant Pathol*. – 2022. – Vol. 120. – P. 101849. <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2022.101849>
11. Cooke, J. The functional ecology of plant silicon: geoscience to genes / J. Cooke, J. L. DeGabriel, S. E. Hartley // *York Environmental Sustainability Institute*. – 2016. – Vol. 30, N 8. – P. 1270–1276. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12711>
12. Effects of silicon nanoparticles on molecular, chemical, structural and ultrastructural characteristics of oat (*Avena sativa* L.) / A. Faride [et al.] // *Plant Physiol. Biochem*. – 2018. – Vol. 127. – P. 152–160. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.03.021>
13. Институт экспериментальной ботаники НАН Беларуси [Электронный ресурс] // Гербарий Института экспериментальной ботаники НАН Беларуси. – Минск, 2022. – Режим доступа: <https://herbarium-msk.botany.by/коллекция-грибов/>. – Дата доступа: 15.08.2022.
14. Институт микробиологии Национальной академии наук Беларуси [Электронный ресурс] // Каталог Белорусской коллекции непатогенных микроорганизмов. – Минск, 2022. – Режим доступа: https://mbio.bas-net.by/bim/ru/filamentous_fungi/Bipolaris/sorokiniana/БИМ_F-464.html. – Дата доступа: 15.08.2022.
15. Morphological and molecular variation between *Fusarium avenaceum*, *Fusarium arthrosporioides* and *Fusarium anguioides* strains / Y. Mattila [et al.] // *Pathogens*. – 2018. – Vol. 7, N 4. – Art. 94. <https://doi.org/10.3390/pathogens7040094>
16. Межгосударственный стандарт. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести. – М. : Стандартинформ, 2011. – 31 с.
17. Рокицкий, П. Ф. Биологическая статистика / П. Ф. Рокицкий. – Минск : Высш. шк., 1973. – 320 с.
18. Азизбекян, С. Г. Исследование эффективности микроудобрений на основе наночастиц биоэлементов / С. Г. Азизбекян, А. Р. Набиуллин, В. И. Домаш // *Нанотехника*. – 2012. – № 4. – С. 70–71.
19. Морфология и биологическая активность наносистем на основе наночастиц селена / С. В. Валуева [и др.] // *Нанотехника*. – 2012. – № 4. – С. 53–58.
20. Азизбекян, С. Г. Наноплант – новое отечественное микроудобрение / С. Г. Азизбекян, В. И. Домаш // *Наше сельское хозяйство. Агрономия*. – 2015. – № 7. – С. 68–72.
21. Yurkevich, E. S. Study of toxicological properties of microfertilizers Nanoplant in experiments *in vitro* / E. S. Yurkevich, M. V. Anisovich, S. G. Azizbekyan // *Bionanotox 2018: 9th International congress “Biomaterials and Nanobiomaterials: Recent Advances Safety – Toxicology and Ecology Issues”*, May 06–13, 2018, Heraklion, Greece. – P. 45–46.
22. Study of the toxicological properties of microfertilizers / M. M. Vasilyeva [et al.] // *Publ. Health Toxicol*. – 2021. – P. 24. <https://doi.org/10.18332/pht/142259>
23. Anisovich, M. I. Investigation of the change in the toxicological properties of microelements in the synthesis of nanofertilizer / M. I. Anisovich // *NanoTox 2018: 9th International conference on nanotoxicology “New tools in risk assessment of nanomaterials”*, September 18–21, 2018, Neuss, Germany. – 2018. – P. 97.
24. Межгосударственный стандарт. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности. – М. : Стандартинформ, 2007. – 7 с.
25. The use of biological selenium nanoparticles to suppress *Triticum aestivum* L. crown and root rot diseases induced by *Fusarium* species and improve yield under drought and heat stress / M. T. El-Saadony [et al.] // *Saudi J. Biol. Sci*. – 2021. – Vol. 28, N 8. – P. 4461–4471. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.04.043>
26. Kalboush, Z. A. Biogenic silica nanoparticles, synthesis, characterization and antifungal activity against two rice pathogenic fungi / Z. A. Kalboush, W. E. Gabr, A. A. Hassan // *Egypt. J. Agric. Res*. – 2017. – Vol. 95, N 2. – P. 543–558. <https://doi.org/10.21608/EJAR.2017.148458>

27. Асанова, А. А. Изменение ростовых показателей овса посевного *Avena sativa* под воздействием наночастиц диоксида титана и кремния / А. А. Асанова, В. И. Полонский // Вестн. Красноярск. гос. аграр. ун-та. – 2019. – № 8. – С. 3–9.
28. Ростостимулирующая активность нанокмозитов селена в природных полимерных матрицах при прорастании семян культурных растений / В. Н. Нурминский [и др.] // Докл. Рос. акад. наук. науки о жизни. – 2020. – Т. 495, № 1. – С. 607–611.
29. Биологические эффекты наночастиц селена и селенита натрия на клеточные культуры многоколосника морщинистого / А. А. Кузовкова [и др.] // Факторы экспериментальной эволюции организмов: сб. науч. тр. / НАН Украины, Укр. о-во генетиков и селекционеров им. Н. И. Вавилова. – Киев, 2013. – Т. 12. – С. 260–264.
30. Бруй, И. Г. Нанозащита от стрессов / И. Г. Бруй, С. Г. Азизбеян, В. И. Домаш // Наше сельск. хоз-во. – 2018. – № 7. – С. 58–61.
31. Effects of silicon and silicon-based nanoparticles on rhizosphere microbiome, plant stress and growth / V. D. Rajput [et al.] // *Biology*. – 2021. – Vol. 10, N 8. – Art. 791. <https://doi.org/10.3390/biology10080791>
32. The influence of silicon oxide nanoparticles on morphometric parameters of monocotyledons and dicotyledons in soil and climatic conditions of Western Siberia, as well as on microbiological soil properties / N. Tereshchenko [et al.] // *BioNanoScience*. – 2017. – Vol. 7. – P. 703–711. <https://doi.org/10.1007/s12668-017-0419-x>
33. Немцова, Е. В. Влияние аморфного диоксида кремния и его золя на параметры роста некоторых зерновых культур / Е. В. Немцова // Ежегодник НИИ фонд. и прикл. исслед. – 2018. – № 1. – С. 41–44.
34. Немцова, Е. В. Влияние диоксида кремния «Ковелос-сорб» на параметры роста *Rhododendron Roseum* (Loisel.) Rehder в культуре *in vitro* / Е. В. Немцова, А. В. Харин, И. А. Разлуга // Вестн. Нижегород. гос. ун-та. – 2020. – № 1. – С. 48–55.
35. Comparative efficacy of bio-selenium nanoparticles and sodium selenite on morpho-physiochemical attributes under normal and salt stress conditions, besides selenium detoxification pathways in *Brassica napus* L. / A. M. El-Badri [et al.] // *J. Nanobiotech.* – 2022. – Vol. 20, N 1. – P. 1–23. <https://doi.org/10.1186/s12951-022-01370-4>
36. Effect of fluoride and cadmium stress on the uptake and translocation of fluoride and cadmium and other mineral nutrition elements in radish in single element or cotaminated sizerow / Y. Chen [et al.] // *Environment. Experim. Botany*. – 2017. – Vol. 134. – P. 54–61. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2016.11.002>
37. Шелепова, О. В. Агроэкологическое значение фтора / О. В. Шелепова, Ю. А. Потатуева // *Агрохимия*. – 2003. – № 9. – С. 78–87.

References

1. Savary S., Ficke A., Aubertot J. N., Clayton H. Crop losses due to diseases and their implications for global food production losses and food security. *Food Security*, 2012, vol. 4, no. 11, pp. 519–537. <https://doi.org/10.1007/s12571-012-0200-5>
2. Wegulo S. N., Baenziger P. S., Nopsa J. H., Bockus W. W., Hallen-Adams H. Management of Fusarium head blight of wheat and barley. *Crop Protection*, 2015, vol. 73, no. 8, pp. 100–107. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2015.02.025>
3. Ovsyankina A. V. Root rot of grain. *Teoriya i praktika bor'by s parazitarnymi boleznyami* [Theory and practice of combating parasitic diseases], 2012, no. 13, pp. 300–303 (in Russian).
4. Gikas G. D., Parlakidis P., Mavropoulos T., Vryzas Z. Particularities of fungicides and factors affecting their fate and removal efficacy: a review. *Sustainability*, 2022, vol. 14, no. 7, pp. 1050–1073.
5. Wu H., Li Z. Recent advances in nano-enabled agriculture for improving plant performance. *Crop*, 2022, vol. 10, no. 1, pp. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2021.06.002>
6. Graskova I. A., Perfil'eva A. I., Nozhkina O. A., D'yakova A. V., Nurminskii V. N., Klimentov I. V. [et al.]. The effect of nanoscale selenium on the causative agent of ring rot and potatoes *in vitro*. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of plant raw materials], 2019, no. 3, pp. 345–354 (in Russian).
7. Datnoff L. E., Seebold K. W., Correa-V F. J. Chapter 10 The use of silicon for integrated disease management: reducing fungicide applications and enhancing host plant resistance. *Studies in Plant Science*, 2001, vol. 8, no. 1, pp. 171–184.
8. Wang H., Zhang J., Yu H. Elemental selenium at nano size possesses lower toxicity without compromising the fundamental effect on selenoenzymes: comparison with selenomethionine in mice. *Free Radical Biology and Medicine*, 2007, vol. 42, no. 10, pp. 1524–1533. <https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2007.02.013>
9. Mosa M. A., El-Abeid S. E., Khalifa M. A., Elsharouny T. H., El-Baz S. M., Ahmed A. Y. Smart pH responsive system based on hybrid mesoporous silica nanoparticles for delivery of fungicide to control Fusarium crown and root rot in tomato. *Plant Pathology*, 2022, vol. 104, no. 7, pp. 979–992. <https://doi.org/10.1007/s42161-022-01122-1>
10. Holz T. M., Dorneles K. R., Brunetto A. E., Segundo J. B. M., Delevatti H. A., Souza G. M., Dallagnol L. J. Effect of silicon and fungicide on photosynthetic responses in barley leaves challenged by *Bipolaris sorokiniana*. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 2022, vol. 120, pp. 101–149. <https://doi.org/10.1016/j.pmp.2022.101849>
11. Cooke J., DeGabriel J. L., Hartley S. E. The functional ecology of plant silicon: geoscience to genes. *York Environmental Sustainability Institute*, 2016, vol. 20, pp. 15–30. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12711>
12. Faride A., Majd A., Jonoubi P., Najafi F. Effects of silicon nanoparticles on molecular, chemical, structural and ultrastructural characteristics of oat (*Avena sativa* L.). *Plant Physiology and Biochemistry*, 2018, vol. 127, pp. 152–160. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.03.021>
13. Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus. *Herbarium of the Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus*. Available at: <https://herbarium-msk.botany.by/collection-mushrooms> (accessed 08.15.2022) (in Russian).

14. Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus. *Catalog of the Belarusian collection of non-pathogenic microorganisms*. Available at: https://mbio.bas-net.by/bim/ru/filamentous_fungi/Bipolaris/sorokiniana/BIM_F-464.html (accessed 08.15.2022) (in Russian).
15. Mattila Y., Hussien T., Gavrilova O., Gagkaeva T. Morphological and molecular variation between *Fusarium avenaceum*, *Fusarium arthrosporioides* and *Fusarium anguioideis* strains. *Pathogens*, 2018, vol. 7, no. 4, art. 94. <https://doi.org/10.3390/pathogens7040094>
16. *Interstate standard. Seeds of agricultural crops. Germination methods*. Moscow, Standartinform Publ., 2011. 31 p. (in Russian).
17. Rokitskii P. F. *Biological statistics*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1973. 320 p. (in Russian).
18. Azizbekyan S. G., Nabiullin A. R., Domash V. I. Study of the effectiveness of microfertilizers based on nanoparticles of bioelements. *Nanotekhnika [Nanotechnology]*, 2012, no. 4, pp. 70–71 (in Russian).
19. Valueva S. V., Azizbekyan S. G., Kuchinskii M. P., Nabiullin A. R., Sukhanova T. E. Morphology and biological activity of nanosystems based on selenium nanoparticles. *Nanotekhnika [Nanotechnology]*, 2012, no. 4, pp. 53–58 (in Russian).
20. Azizbekyan S. G., Domash V. I. Nanoplant – a new domestic microfertilizer. *Nashe sel'skoe khozyaistvo. Agronomiya [Our agriculture. Agronomy]*, 2015, no. 7, pp. 68–72 (in Russian).
21. Yurkevich E. S., Anisovich M. V., Azizbekyan S. G. Study of toxicological properties of microfertilizers Nanoplant in experiments in vitro. *Bionanotox 2018: 9th International congress "Biomaterials and Nano-biomaterials: Recent Advances Safety – Toxicology and Ecology Issues"*, May 06–13, 2018, Heraklion, Greece, 2018, pp. 45–46.
22. Vasilyeva M. M., Ilykova I. I., Anisovich M. V., Hamolka T. N., Azizbekyan S. G., Yurkevich H. S., Ioda V. I. Study of the toxicological properties of microfertilizers. *Public Health Toxicology*, 2021, p. 24. <https://doi.org/10.18332/pht/142259>
23. Anisovich M. I. Investigation of the change in the toxicological properties of microelements in the synthesis of nanofertilizer. *NanoTox 2018: 9th International conference on nanotoxicology "New tools in risk assessment of nanomaterials"*, September 18–21, 2018, Neuss, Germany, 2018, p. 97.
24. *Interstate standard. Harmful substances. Classification and general safety requirements*. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 7 p. (in Russian).
25. El-Saadony M. T., Saad A. M., Najjar A. A., Alzahrani S. O., Alkhatib F. M., Shafi M. E. [et al.]. The use of biological selenium nanoparticles to suppress *Triticum aestivum* L. crown and root rot diseases induced by *Fusarium* species and improve yield under drought and heat stress. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 2021, vol. 28, no. 8, pp. 4461–4471. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.04.043>
26. Kalboush Z. A., Gabr W. E., Hassan A. A. Biogenic silica nanoparticles, synthesis, characterization and antifungal activity against two rice pathogenic fungi. *Egyptian Journal of Agricultural Research*, 2017, vol. 95, no. 2, pp. 543–558. <https://doi.org/10.21608/EJAR.2017.148458>
27. Asanova A. A., Polonskii V. I. Changes in growth indicators of *avena sativa* under the influence of titanium dioxide and silicon dioxide nanoparticles. *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [Bulletin of the Krasnoyarsk State Agrarian University]*, 2019, no. 8, pp. 3–9 (in Russian).
28. Nurminskii V. N., Perfil'eva A. I., Kapustina I. S., Graskova I. A., Sukhov B. G., Trofimov B. A. Growth-stimulating activity of selenium nanocomposites in natural polymer matrices during the germination of seeds of cultivated plants. *Doklady Rossiiskoi akademii nauk. Nauki o zhizni [Reports of the Russian Academy of Sciences. Life Sciences]*, 2020, vol. 1, no. 495, pp. 607–611 (in Russian).
29. Kuzovkova A. A., Mazur T. V., Azizbekyan S. G., Reshetnikov V. N. biological effects of selenium and sodium selenite nanoparticles on cell cultures of *polygonum rugosa*. *Faktyory eksperimental'noi evolyucii organizmov: sb. nauch. tr. [Factors of experimental evolution of organisms: collection of scientific papers]*. Kiev, Logos, 2013, no. 12, pp. 260–264 (in Russian).
30. Brui I. G., Azizbekyan S. G., Domash V. I. Nanoprotection against stress. *Nashe sel'skoe khozyaistvo [Our agriculture]*, 2018, no. 7, pp. 58–61 (in Russian).
31. Rajput V. D., Minkina T., Feizi M., Kumari A., Khan M., Mandzhieva S. [et al.]. Effects of silicon and silicon-based nanoparticles on rhizosphere microbiome, plant stress and growth. *Biology*, 2021, vol. 10, no. 8, art. 791. <https://doi.org/10.3390/biology10080791>
32. Tereshchenko N., Zmeeva O., Makarov B., Kravets A., Svetlichny V., Lapin I., Zotikova A., Petrova L., Yunusova T. The influence of silicon oxide nanoparticles on morphometric parameters of monocotyledons and dicotyledons in soil and climatic conditions of Western Siberia, as well as on microbiological soil properties. *BioNanoScience*, 2017, vol. 7, pp. 703–711. <https://doi.org/10.1007/s12668-017-0419-x>
33. Nemtsova E. V., Kharin A. V., Razlugo I. A., Vykhor' T. P. Influence of amorphous silicon dioxide and its sol on the growth parameters of some grain crops. *Ezhegodnik NII fundamental'nykh i prikladnykh issledovaniy [Yearbook of the Research Institute of Fundamental and Applied Research]*, 2018, no. 1, pp. 41–44 (in Russian).
34. Nemtsova E. V., Kharin A. V., Razlugo I. A. Influence of silicon dioxide "Kovelos-sorb" on the growth parameters of *Rhododendron Roseum* (Loisel.) Rehder in *in vitro* culture. *Vestnik Nizhnevartovskogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of Nizhnevartovsk State University]*, 2020, no. 1, pp. 48–55 (in Russian).
35. El-Badri A. M., Hashem A. M., Batool M., Sherif A., Nishawy E., Ayaad M. [et al.]. Comparative efficacy of bio-selenium nanoparticles and sodium selenite on morpho-physiochemical attributes under normal and salt stress conditions, besides selenium detoxification pathways in *Brassica napus* L. *Journal of Nanobiotechnology*, 2022, vol. 20, no. 1, pp. 1–23. <https://doi.org/10.1186/s12951-022-01370-4>

36. Chen Y., Wang S., Nan Z., Ma J., Zhang F., Li Y., Zhang Q. Effect of fluoride and cadmium stress on the uptake and translocation of fluoride and cadmium and other mineral nutrition elements in radish in single element or cotaminated sierozem. *Environmental and Experimental Botany*, 2017, vol. 134, pp. 54–61. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2016.11.002>

37. Shelepova O. V., Potatueva Yu. A. Agro-ecological significance of fluorine. *Agrokimiya* [Agrochemistry], 2003, no. 9, pp. 78–87 (in Russian).

Информация об авторах

Курнушко Анна Сергеевна – мл. науч. сотрудник. Институт экспериментальной ботаники им. В. Ф. Купревича НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 2200072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: annkurnushko@mail.ru

Скуратович Татьяна Александровна – канд. биол. наук, вед. науч. сотрудник. Институт экспериментальной ботаники им. В. Ф. Купревича НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 2200072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: tskuratovich@yandex.by

Бекиш Юлия Николаевна – канд. хим. наук, ст. науч. сотрудник. Институт физико-органической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 13, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: ybekish81@gmail.com

Азизбекян Сергей Гургенович – ст. науч. сотрудник. Институт физико-органической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 13, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: s.az@mail.ru

Молчан Ольга Викторовна – канд. биол. наук, доцент, заведующий лабораторией. Институт экспериментальной ботаники им. В. Ф. Купревича НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: olga_molchan@mail.ru

Information about the authors

Anna S. Kurnushko – Junior Researcher. V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 2200072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: annkurnushko@mail.ru

Tatiana A. Skuratovich – Ph. D. (Biol.), Leading Researcher. V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 2200072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: tskuratovich@yandex.by

Yuliya N. Bekish – Ph. D. (Chem.), Senior Researcher. Institute of Physical and Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (13, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ybekish81@gmail.com

Siarhei G. Azizbekyan – Senior Researcher. Institute of Physical and Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (13, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: s.az@mail.ru

Olga V. Molchan – Ph. D. (Biol.), Associate Professor, 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: olga_molchan@mail.ru

ISSN 1029-8940 (Print)
ISSN 2524-230X (Online)
УДК 574.587
<https://doi.org/10.29235/1029-8940-2023-68-4-345-352>

Поступила в редакцию 24.01.2023
Received 24.01.2023

И. И. Лапука³

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

ТРОФИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ЗООБЕНТОСА ВОДОЕМА-ОХЛАДИТЕЛЯ ЛУКОМЛЬСКОЙ ГРЭС

Аннотация. Изучена трофическая структура донного населения подогреваемой и неподогреваемой зон оз. Лукомльское. В выделенных основных трофических группах наибольшая удельная численность была у собирателей, активных фильтраторов и хищников. В сравнении с контрольной зоной в подогреваемой наблюдалось увеличение доли собирателей и измельчителей, уменьшение – активных фильтраторов.

Ключевые слова: зообентос, трофическая структура, Лукомльская ГРЭС, подогреваемая зона, неподогреваемая зона

Для цитирования: Лапука, И. И. Трофическая структура зообентоса водоема-охладителя Лукомльской ГРЭС / И. И. Лапука // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. біял. навук. – 2023. – Т. 68, № 4. – С. 345–352. <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2023-68-4-345-352>

И́я I. Лапука

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

TROPHIC STRUCTURE OF THE ZOOBENTHOS IN THE WATER-COOLING POOL OF LUKOMLSKAYA GRES

Abstract. In this work we was studied the trophic structure of the zoobenthos of Lake Lukomlskoye. Five trophic structures have been recorded in the lake: collectors, predators, active filter feeders, scrapers and shredders. Collectors, predators and active filter feeders had the highest specific abundance. A decrease in the proportion of active filter feeders and an increase in collectors in the heated zone was established.

Keywords: zoobenthos, trophic structure, Lukomlskaya GRES, hated zone, non-hated zone

For citation: Lapuka I. I. Trophic structure of the zoobenthos in the water-cooling pool of Lukomlskaya GRES. *Vesti Natsyunal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya biyalagichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological series*, 2023, vol. 68, no. 4, pp. 345–352 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2023-68-4-345-352>

Введение. Трофическая структура – одна из важнейших составляющих общей структуры сообщества зообентоса, показывающая уровень продуцирования. Соотношение разных компонентов пищевого потока отображается в трофической структуре донного населения, которую целесообразно представлять в виде долевого участия различных функциональных групп в трансформации органических веществ [1].

Сообщество макрозообентоса включает множество трофических групп, потребляющих различные пищевые ресурсы. В зависимости от типа питания видов, а также от взаимоотношений между отдельными группами формируется трофическая структура. Нарушения или изменения трофической структуры происходят по многим причинам: рост или снижение уровня трофии водоема, вселение новых видов, изменение основных экологических условий и т. д. Так, известно, что повышение температуры воды в водоемах-охладителях увеличивает доступность питательных веществ и приводит к неконтролируемому росту водорослей, а также уменьшает количество хищников [2–4]. Из-за потепления климата в экосистемах происходит вытеснение холодолюбивых стенобионтных видов теплолюбивыми, эврибионтными [4, 5] и даже чужеродными видами и формами [4, 6, 7], которые полностью изменяют трофическую структуру водоема.

Исследования, которые проводились ранее в оз. Лукомльском [8, 9], затрагивали только влияние подогрева на таксономический состав и количественные показатели (численность, биомасса) зообентоса, не касаясь трофических компонентов и теплового воздействия на них.

Цель работы – установить особенности трофической структуры водоема-охладителя Лукомльской ГРЭС в подогреваемой и неподогреваемой зонах.

Материалы и методы исследования. Оз. Лукомльское находится в Чашницком районе, в бассейне р. Улла, у западной окраины г. Новолукомль. Площадь озера 36,7 км², длина 10,4 км, максимальная ширина 6,5 км, наибольшая глубина 11,5 м. Дно до глубины 5–6 м выстлано песчаными отложениями, глубже – сапропелем [10].

Пробы зообентоса были отобраны на 5 станциях разной глубины (0,5; 1,5; 3,0; 6,0 и 8,0 м) у сброса подогретых вод и по этим же глубинам вне подогреваемой зоны в летне-осенний период 2019 г. В литоральной зоне отбор проб производили протягиванием гидробиологического сачка, на остальных глубинах – дночерпателем Боруцкого (площадь захвата 0,0225 м²) в трехкратной повторности. Отделение животных от грунта осуществляли в сачке-промывалке из мельничного сита с диаметром ячеек 300 мкм.

Учет и измерение животных производили под бинокулярным микроскопом МБС-10 при 56-кратном увеличении. Детали морфологии уточняли с помощью микроскопа Jenaval при 250-кратном увеличении. Для определения животных использовали различные определители [11–16].

Измерение температуры воды и содержания кислорода проведены термооксиметром Hanna HI 9143. Результаты измерений представлены в нашей предыдущей работе [17].

Для разделения видов на трофические группы использовали классификацию О. Моог с соавт. [18], которая положена в основу программы Asterix 4.04, позволяющей рассчитывать удельные величины численности трофических групп в общей численности макрозообентоса, а также данные по типу питания, изложенные в монографии А. В. Монакова [19]. При оценке трофической структуры использовали относительные значения численности трофических групп в общей численности макрозообентоса. Для некоторых видов макрозообентоса принадлежность к трофической группе из-за отсутствия данных по питанию не определена.

Результаты и их обсуждение. В трофической структуре оз. Лукомльское установлено 5 трофических групп. Максимальные значения средней удельной численности по всему водоему во все сезоны было у собирателей (54 %), затем следовали активные фильтраторы (29 %), хищники (11 %), соскребатели (5 %) и измельчители (1 %).

Трофическая группа собирателей в оз. Лукомльское состояла из хирономид и зависела от развития таких видов, как *Chironomus f. l. plumosus* (Meigen, 1830), *Polypedilum nubeculosum* (Meigen, 1804), *Dicrotendipes nervosus* (Staeger, 1839). Активные фильтраторы представлены двусторчатым моллюском *Dreissena polymorpha* (Pallas, 1771). Основной вклад в группу хищников оз. Лукомльское вносят представители хищного рода личинок хирономид *Procladius sp.*

В пространственном распределении от прибрежья до границы подводной растительности (3 м) отмечается увеличение количества трофических групп и максимальных значений абсолютной численности. Далее эти показатели снижаются, а в профундальной зоне обнаруживаются только представители собирателей и хищников (рис. 1).

В подогреваемой зоне оз. Лукомльское, как и в среднем по всему озеру, доминируют собиратели (69 %), активные фильтраторы (13 %) и хищники (11 %) (рис. 2).

Высокий процент собирателей по отношению к остальным группам объясняется развитием комплекса эврибионтных видов отр. Diptera (*Chironomus f. l. plumosus*, *Polypedilum nubeculosum*), для которых подогрев не является лимитирующим фактором. Пониженная доля активных фильтраторов в подогреваемой зоне связана с тем, что из-за течения дрейссена не может закрепиться на субстрате. Хищники, как и собиратели, представлены в основном отр. Diptera (*Procladius sp.*, *Cryptochironomus obreptans* (Walker, 1856)).

В пространственном распределении максимальные значения численности трофических групп, кроме хищников, в подогреваемой зоне, как и в среднем по озеру, относятся к глубине 3 м (рис. 3).

В неподогреваемой зоне оз. Лукомльское, как и в среднем по всему озеру, доминируют собиратели (45 %), активные фильтраторы (38 %) и хищники (11 %) (рис. 4).

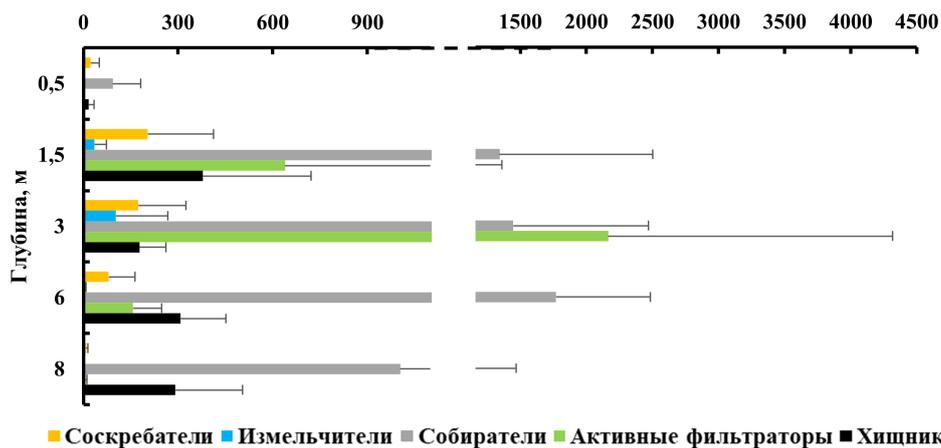


Рис. 1. Пространственное распределение численности трофических групп в оз. Лукомльское
 Fig. 1. Spatial distribution of the number of trophic groups in the Lake Lukomlskoye

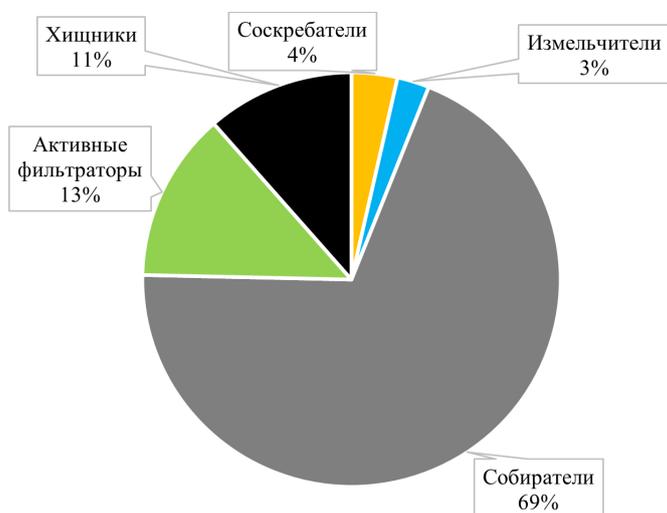


Рис. 2. Удельное распределение численности трофических групп в подогреваемой зоне оз. Лукомльское
 Fig. 2. Specific distribution of the number of trophic groups in the heated zone of the Lake Lukomlskoye

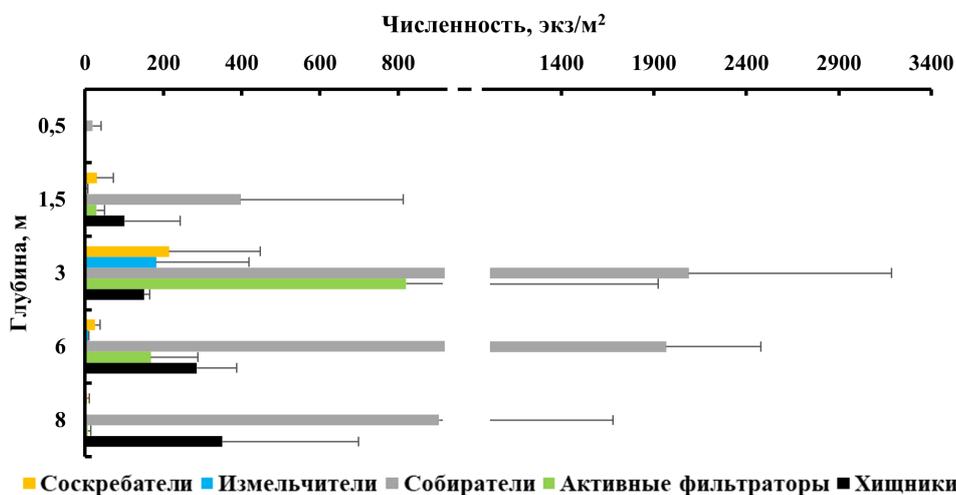


Рис. 3. Пространственное распределение численности трофических групп в подогреваемой зоне оз. Лукомльское
 Fig. 3. Spatial distribution of the number of trophic groups in the heated zone of the Lake Lukomlskoye

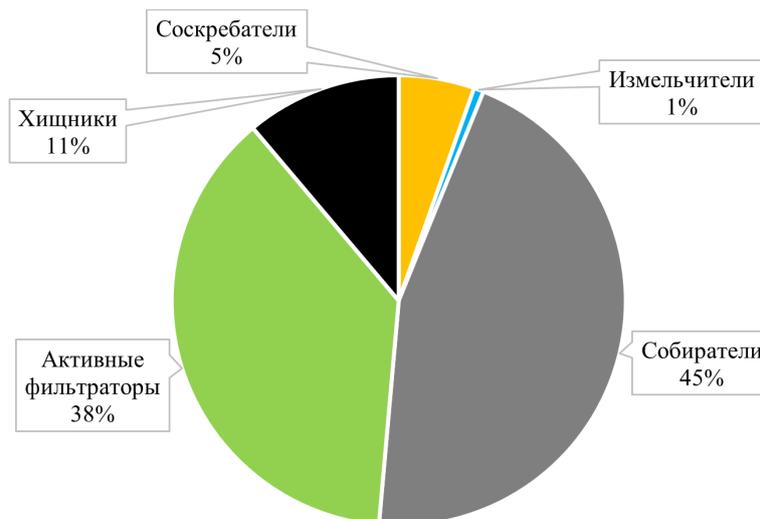


Рис. 4. Удельное распределение численности трофических групп в непогреваемой зоне оз. Лукомльское
 Fig. 4. Specific distribution of the number of trophic groups in the unheated zone of the Lake Lukomlskoye

В непогреваемой зоне происходит снижение удельной численности собирателей и увеличение доли активных фильтраторов. Связано это с развитием дрейссены не только на глубине 3 м, как в подогреваемой зоне, но и на глубине 1,5 м.

Хотя относительная численность собирателей ниже средней по озеру и в подогреваемой зоне, состав этой группы более разнообразен – в него входит большее количества таксонов, чем в подогреваемой зоне (*Chironomus f. l. plumosus*, *Polypedilum nubeculosum*, *Microtendipes pedellus* (De Geer, 1776), *Dicortendipes nervosus*). Хищники представлены в основном одним таксоном – *Procladius sp.*

В пространственном распределении максимальные значения численности в непогреваемой зоне, как и в среднем по озеру, относятся к глубине 3 м, кроме хищников и собирателей, максимальное количество которых отмечалось на глубине 1,5 м (рис. 5).

В целом, независимо от зоны озера, в водоеме-охладителе Лукомльской ГРЭС доминирующей группой являются собиратели. На преобладание этой трофической группы в зообентосе озер указывают ряд исследователей [20–23].

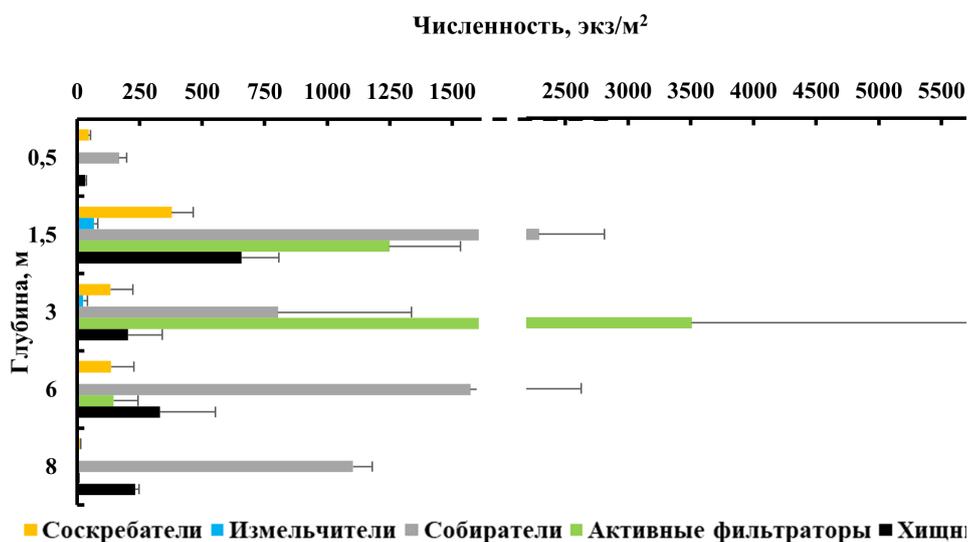


Рис. 5. Пространственное распределение численности трофических групп в непогреваемой зоне оз. Лукомльское
 Fig. 5. Spatial distribution of the number of trophic groups in the unheated zone of the Lake Lukomlskoye

Оценка влияния подогрева на трофическую структуру, согласно литературным данным, не однозначна. Так, при исследованиях Беловского водохранилища (Беловская ГРЭС) отмечено упрощение трофической структуры зообентоса: обнаружена общая тенденция вытеснения из бентоса хищников (*Procladius ferrugineus* Kieffer, 1918, *Cryptochironomus gr. defectus*, Kieffer, 1913) и фильтраторов (р. *Pisidium*) эври- и детритофагами, способными поглощать грубую пищу (*Gammarus fasciatus* Say, 1818; роды *Lymnaea*, *Glyptotendipes glaucus* (Meigen, 1818)) [24]. Исследования водоема-охладителя Лукомльской ГРЭС, проведенные А. Ю. Каратаевым ранее, также показали, что в зонах с искусственным подогревом происходит снижение доминирования рода *Pisidium*, виды которого относятся в основном к активным фильтраторам, и увеличение доминирования олигохет, относящихся к собирателям [9].

Изучение трофической структуры Рыбинского водохранилища при влиянии аномально высокой температуры воды на макрозообентос показало, что хищники исчезли и уменьшилось количество моллюсков-фильтраторов (роды *Pisidium* и *Dreissena*) [4].

При исследовании водоема-охладителя Новомичуринской ГРЭС также отмечено, что хищники наиболее чувствительны к органическому и тепловому загрязнению, а наименее чувствительны к действию обоих факторов собиратели, которые занимают промежуточное положение, составляя максимальную долю при умеренном воздействии факторов [25].

Снижение доли хищников при эвтрофикации и термической нагрузке, по-видимому, общая специфическая реакция донного сообщества на изменение условий обитания [22]. Однако анализ показал, что в нашем конкретном случае подогрев не влияет на изменение относительной численности хищников (она находится на уровне 11 %), что подтверждает выдвинутое ранее нами предположение о том, что «влияние подогрева в подогреваемой зоне распространяется только до глубины 2 м» [17]. Несмотря на то что общая доля хищников, независимо от зоны, остается неизменной, в пространственном распределении происходит увеличение численности хищных форм от сублиторальной зоны до дна в подогреваемой зоне, в непогреваемой – наоборот. Такое распределение хищников обусловлено тем, что в сублиторали (1,5 м) непогреваемой зоны, в отличие от подогреваемой, происходит развитие представителей класса Hirudinea (*Glossiphonia complanata* (Linnaeus, 1758)). С увеличением глубины в обеих зонах трофическая группа хищников зависит только от развития представителей отряда Diptera. В подогреваемой зоне постепенное увеличение численности хищников (от сублиторали до дна) зависело от плотности различных таксонов на определенной глубине: 1,5–3 м – *Cryptochironomus obreptans* (Walker, 1856), 6 м – *Procladius sp.*, 8 м – *Chaoborus sp.* Такое распределение хищников подтверждает сделанный нами ранее вывод о том, что температурное влияние распространяется до глубины 2 м, где и происходит небольшое угнетение развития хищных форм.

Увеличение удельной доли собирателей в подогреваемой зоне обусловлено высокой численностью олигохет в сублиторальной зоне. Так как видовой состав олигохет нами не определялся, на основании результатов исследований А. Ю. Каратаева можно предположить, что высокая их численность в сублиторальной зоне зависит от развития двух видов – *Limnodrilus hoffmeisteri* и *Bothrioneurum vej dovskyanum* [9], которые являются собирателями.

В нашем исследовании непосредственного влияния высокой температуры на активных фильтраторов не отмечено, но установлено снижение их численности в акватории воздействия течения сбросных вод [17].

Согласно литературным данным, роль измельчителей увеличивается в зоне подогрева [22], что подтверждают и результаты нашей работы. Связано это с благоприятными условиями в подогреваемой зоне для развития водных мхов и высших растений, которые являются пищевыми субстратами для этой трофической группы.

Заключение. Таким образом, в оз. Лукомльское зафиксировано 5 трофических групп, сформированных в основном собирателями, активными фильтраторами и хищниками. В подогреваемой зоне за счет сброса вод происходит смыв верхнего питательного слоя грунта до глубины 2 м, что сказывается на развитии всех трофических групп, кроме собирателей. На влияние подогрева в исследованном озере указывает увеличение удельной численности измельчителей. Различие в трофической структуре подогреваемой и непогреваемой зон зависит еще и от угнетения раз-

вития активных фильтраторов, что ведет к увеличению доли собирателей в зоне подогрева. Результаты полученной работы можно использовать для прогнозирования изменения трофической структуры макрозообентоса озер при потеплении климата.

Благодарности. Работа выполнена с поддержкой грантов БРФФИ № Б23М-052 и № Б21АРМ-006.

Acknowledgements. The work was supported by BRFFR grants No. B23M-052 and No. B21ARM-006.

Список использованных источников

1. Беляков, В. П. Изменения продукционных характеристик и трофической структуры зообентоса озера Красного в зависимости от природных и антропогенных факторов / В. П. Беляков, А. И. Бажора // Рос. журн. прикл. экологии. – 2018. – № 4 (16). – С. 11–15.
2. Cazzolla Gatti, R. Freshwater biodiversity: a review of local and global threats / G. R. Cazzolla // Int. J. Environ. Stud. – 2016. – Vol. 73, N 6. – P. 887–904. <https://doi.org/10.1080/00207233.2016.1204133>
3. Ecosystem responses to climate change in a large on-river reservoir, Lake Paldang, Korea / Н.-К. Park [et al.] // Climate Change. – 2013. – Vol. 120, N 1. – P. 477–489. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0801-9>
4. Перова, С. Н. Изменения структуры макрозообентоса Рыбинского водохранилища в условиях повышения температуры / С. Н. Перова // Биология внутр. вод. – 2019. – Т. 2, № 4. – С. 44–54.
5. Downing, J. A. Productivity of freshwater ecosystems and climate change / J. A. Downing // Global Environmental Change. Handbook of Global Environmental Pollution / ed. B. Freedman. – Dordrecht, 2014. – Vol. 1. – P. 221–229. https://doi.org/10.1007/978-94-007-5784-4_127
6. Kernan, M. Climate change and the impact of invasive species on aquatic ecosystems / M. Kernan // Aquat. Ecosyst. Health Manag. – 2015. – Vol. 18, N 3. – P. 321–333. <https://doi.org/10.1080/14634988.2015.1027636>
7. Mosello, R. Climate change and related effects on water quality: examples from Lake Maggiore (Italy) / R. Mosello, A. Lami // Glob. Bioethics. – 2011. – Vol. 24, N 1–4. – P. 95–98. <https://doi.org/10.1080/11287462.2011.10800706>
8. Экосистема водоема-охладителя Лукомльской ГРЭС / П. А. Митрахович и [др.]. – Минск : Право и экономика, 2008. – 144 с.
9. Каратаев, А. Ю. Экология макробеспозвоночных водоемов-охладителей Белоруссии / А. Ю. Каратаев. – Минск, 1988. – 178 с. – Деп. В ВИНТИ 14.12.1988. – № 8758.
10. Блакітная кніга Беларусі (Водныя аб'екты Беларусі) : энцыклапедыя / пад рэд. Н. А. Дзісько [і інш.]. – Мінск : Беларус. Энцыкл., 1994. – 415 с.
11. Качалова, О. Л. Отряд ручейники Trichoptera / О. Л. Качалова, Л. А. Кутикова, Я. И. Старобогатов // Определитель пресноводных беспозвоночных Европейской части СССР / отв. ред. : Л. А. Кутикова, Я. И. Старобогатов. – Л., 1977. – С. 477–510.
12. Лукин, Е. И. Класс пиявки Hirudinea / Е. И. Лукин, Л. А. Кутикова, Я. И. Старобогатов // Определитель пресноводных беспозвоночных Европейской части СССР / отв. ред. : Л. А. Кутикова, Я. И. Старобогатов. – Л., 1977. – С. 201–212.
13. Попова, А. Н. Отряд стрекозы Odonata / А. Н. Попова, Л. А. Кутикова, Я. И. Старобогатов // Определитель пресноводных беспозвоночных Европейской части СССР / отв. ред. : Л. А. Кутикова, Я. И. Старобогатов. – Л., 1977. – С. 266–287.
14. Макаrenchенко, Е. А. Семейство комары звонцы Chironomidae / Е. А. Макаrenchенко // Определитель пресноводных беспозвоночных России и сопредельных территорий / под ред. С. Я. Цалохина. – СПб., 1999. – Т. 4 : Высшие насекомые. Двукрылые. – С. 210–296.
15. Богатов, В. В. Класс Двустворчатые моллюски / В. В. Богатов, П. В. Кияшко // Определитель зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской России / под ред. В. Р. Алексеева, С. Я. Цалохина. – М. ; СПб., 2016. – Т. 2 : Зообентос. – С. 285–335.
16. Кияшко, П. В. Класс Брюхоногие моллюски / П. В. Кияшко, Е. В. Солдатенко, М. В. Винарский // Определитель зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской России / под ред. В. Р. Алексеева, С. Я. Цалохина. – М. ; СПб., 2016. – Т. 2 : Зообентос. – С. 335–439.
17. Лапука, И. И. Влияние подогрева воды на количественные показатели зообентоса водоема-охладителя Лукомльской ГРЭС / И. И. Лапука, В. В. Вежновец // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. біял. навук. – 2021 – Т. 66, № 4. – С. 462–474.
18. Moog O. *Fauna Aquatica Austriaca*, 2nd ed. Wasserwirtschaftskataster, Bundesministerium für Land und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. – Vienna, 2002. – 93 p.
19. Монаков, А. В. Питание пресноводных беспозвоночных / А. В. Монаков ; Ин-т проблем экологии и эволюции им. А. Н. Северцова РАН. – М. : Ин-т проблем экологии и эволюции им. А. Н. Северцова РАН, 1998. – 320 с.
20. Батурина, М. А. Структура и распределение зообентоса озер Харбейской системы: современное состояние и анализ ретроспективных данных / М. А. Батурина, О. А. Лоскутова, Е. Б. Фефилова // XI съезд Гидробиологического общества при Российской академии наук (Красноярск, 22–26 сентября 2014 года) : тез. докл. / гл. ред. М. И. Гладышев ; Сибир. федер. ун-т. – Красноярск, 2014. – С. 25–26.
21. Курашов, Е. А. Мейобентос как компонент озерной экосистемы / Е. А. Курашов ; Ин-т озераведения РАН. – СПб. : Алга-Фонд Ассоциации «Алга», 1994. – 224 с.
22. Яковлев, В. А. Трофическая структура зообентоса – показатель состояния водных экосистем и качества воды / В. А. Яковлев // Вод. ресурсы. – 2000. – Т. 27, № 2. – С. 237–244.

23. Яковлев, В. А. Пресноводный зообентос северной Фенноскандии (разнообразие, структура и антропогенная динамика) : в 2 ч. / В. А. Яковлев ; Рос. акад. наук, Кол. науч. центр, Ин-т проблем пром. экологии Севера, М-во образования и науки Рос. Федерации, Казан. гос. ун-т. – Апатиты : Изд. Кол. науч. центра РАН, 2005. – Ч. 1. – 161 с. – Ч. 2. – 145 с.

24. Яныгина, Л. В. Экология сообществ донных беспозвоночных в водоемах-охладителях тепловых электростанций Сибири / Л. В. Яныгина // Вод. ресурсы. – 2011. – Т. 38, № 5. – С. 618–630.

25. Шуйский, В. Ф. Влияние теплового и органического загрязнения на структуру макробиоценозов водоема-охладителя Новомичуринской ГРЭС / В. Ф. Шуйский, С. В. Чистякова, Н. В. Устюжанина // Влияние рыбного интенсивного хозяйства различных типов на экосистему водоемов-охладителей : сб. науч. тр. / под ред. Г. М. Лаврентьевой ; Гос. НИИ озер. и реч. рыб. хоз-ва. – Л., 1990. – Вып. 309. – С. 56–65.

References

1. Belyakov V. P., Bazhora V. P. *Changes in production characteristics and trophic structure of zoobenthos of the lake Krasnoe depending on natural and anthropogenic factors. Rossiiskii zhurnal prikladnoi ekologii* [Russian journal of applied ecology], 2018, no. 4 (16), pp. 11–15 (in Russian).

2. Cazzolla Gatti R. Freshwater biodiversity: a review of local and global threats. *International Journal of Environmental Studies*, 2016, vol. 73, no. 6, pp. 887–904. <https://doi.org/10.1080/00207233.2016.1204133>

3. Park H.-K., Cho K.-H., Won D., Lee H. J., Kong D.-S., Jung D.-I. Ecosystem responses to climate change in a large on-river reservoir, Lake Paldang, Korea. *Climate Change*, 2013, vol. 120, no. 1, pp. 477–489. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0801-9>

4. Perova S. N. Changes in the structure of macrozoobenthos in the Rybinsk reservoir under conditions of rising temperature. *Biologiya vnutrennikh vod* [Inland water biology], 2019, vol. 2, no. 4, pp. 44–54 (in Russian).

5. Downing J. A. Productivity of freshwater ecosystems and climate change. *Global Environmental Change. Series Handbook of Global Environmental Pollution. Vol. 1*. Dordrecht, 2014, pp. 221–229. https://doi.org/10.1007/978-94-007-5784-4_127

6. Kernan M. Climate change and the impact of invasive species on aquatic ecosystems. *Aquatic Ecosystem Health and Management*, 2015, vol. 18, no. 3, pp. 321–333. <https://doi.org/10.1080/14634988.2015.1027636>

7. Mosello R., Lami A. Climate change and related effects on water quality: examples from Lake Maggiore (Italy). *Global Bioethics*, 2011, vol. 24, no. 1–4, pp. 95–98. <https://doi.org/10.1080/11287462.2011.10800706>

8. Mitrakhovich P. A., Samoilenko V. M., Kartashevich Z. K., Svirid A. A., Kozlov E. A., Korolev G. N., Papko N. A. *The ecosystem of the cooling pond of Lukoml*. Minsk, Pravo i ekonomika Publ., 2008. 144 p. (in Russian).

9. Karataev A. Y. *Ecology of macroinvertebrate cooling ponds in Belarus*. Minsk, 1988. 178 p. (in Russian).

10. Dzis'ko N. A., Kurlovich M. M., Malashevich Ya. V., Zagardni V. G., Samuel' S. P., Sachanka B. I., Khaturovich I. P., Yakushka V. P. (eds.). *The Blue Book of Belarus (water project of Belarus)*. Minsk, Belaruskaya Entsiklopedyya Publ., 1994. 415 p. (in Belarusian).

11. Kachalova O. L., Kutikova L. A., Starobogatov Ja. I. Trichoptera. *Determinant of freshwater invertebrates of the European part of the USSR*. Leningrad, 1977, pp. 477–510 (in Russian).

12. Lukin E. I., Kutikova L. A., Starobogatov Ja. I. Hirudinea. *Determinant of freshwater invertebrates of the European part of the USSR*. Leningrad, 1977, pp. 201–212 (in Russian).

13. Popova A. N., Kutikova L. A., Starobogatov Ja. I. Odonata. Trichoptera. *Determinant of freshwater invertebrates of the European part of the USSR*. Leningrad, 1977, pp. 266–287 (in Russian).

14. Makarchenko E. A. Chironomidae. *Determinant of freshwater invertebrates in Russia and neighboring territories. Vol. 4. Higher insects*. St. Petersburg, 1999, pp. 210–296 (in Russian).

15. Bogatov V. V., Kiyashko P. V. Bivalva. *Determinant of zooplankton and zoobenthos of fresh waters of European Russia. Vol. 2. Zoobenthos*. Moscow, St. Petersburg, 2016, pp. 285–335 (in Russian).

16. Kiyashko P. V., Soldatenko E. V., Vinarskii M. V. *Determinant of zooplankton and zoobenthos of fresh waters of European Russia. Vol. 2. Zoobenthos*. Moscow, St. Petersburg, 2016, pp. 335–439 (in Russian).

17. Lapuka I. I., Vezhnovets V. V. The effect of heating on the quantitative parameters of the zoobenthos of the Lukomlskaya GRES cooling reservoir. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya biyalagichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological series*, 2021, vol. 6, no. 4, pp. 462–474 (in Russian).

18. Moog O. *Fauna Aquatica Austriaca, 2nd ed.* Wasserwirtschaftskataster, Bundesministerium für Land und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Vienna, 2002. 93 p.

19. Monakov, A. V. *Feeding of freshwater invertebrates*. Moscow, A. N. Severtsov Institute of ecology and evolution of the Russian Academy of Sciences, 1998. 320 p. (in Russian).

20. Baturina M. A., Loskutova O. A., Fefilova E. B. Structure and distribution of the zoobenthos of the lakes of the Harbey system: current state and analysis of retrospective data. *XI s'ezd Gidrobiologicheskogo obshchestva pri Rossiiskoi akademii nauk (Krasnoyarsk, 22–26 sentyabrya 2014 goda): tezisy dokladov* [XI Congress of the Hydrobiological Society of the Russian Academy of Sciences (Krasnoyarsk, September 22–26, 2014): abstracts of reports]. Krasnoyarsk, 2014, pp. 25–26 (in Russian).

21. Kurashov E. A. Meiobenthos as a component of the lake ecosystem. St. Petersburg, Alga-Fond Assotsiatsii “Alga” Publ., 1994. 224 p. (in Russian).

22. Yakovlev V. A. Trophic structure of zoobenthos – an indicator of the state of aquatic ecosystems and water quality. *Vodnye resursy* [Water resources], 2000, vol. 27, no. 2, pp. 237–244 (in Russian).

23. Yakovlev V. A. *Freshwater zoobenthos of northern Fennoscandia (diversity, structure and anthropogenic dynamics)*. Apatity, Publishing house of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences, 2005. Vol. 1. – 161 p. Vol. 2. – 145 p. (in Russian).

24. Yanygina L. V. *Ecology of benthic invertebrate communities in cooling reservoirs of thermal power stations in Siberia*. *Vodnye resursy* [Water resources], 2011, vol. 38, no. 5, pp. 670–681 (in Russian).

25. Shuiskii V. F., Chistyakova S. V., Ustyuzhanina N. V. Influence of thermal and organic pollution on the structure of macrobiocenoses of the Novomichurinskaya GRES cooling pond. *Vliyaniye rybnogo intensivnogo khozyaistva razlichnykh tipov na ekosistemu vodoemov-okhladitelei: sbornik nauchnykh trudov* [The influence of various types of intensive fisheries on the ecosystem of cooling ponds: a collection of scientific papers]. Leningrad, 1990, vol. 309, pp. 56–65 (in Russian).

Информация об авторе

Лапука Илья Игоревич – мл. науч. сотрудник. Научно-практический центр НАН Беларуси по биоресурсам (ул. Академическая, 27, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: ilya.lapua@yandex.ru

Information about the author

Ilya I. Lapuka – Junior Researcher. Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Bioresources (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ilya.lapua@yandex.ru