

ДОКЛАДЫ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ

МИНСК. БЕЛОРУССКАЯ НАУКА. 2022. ТОМ 66. № 3

Выходит шесть номеров в год

Журнал основан в июле 1957 года

Учредитель – Национальная академия наук Беларуси

Журнал зарегистрирован в Министерстве информации Республики Беларусь,
свидетельство о регистрации № 387 от 18.05.2009.

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

Главный редактор

Владимир Григорьевич Гусаков

Председатель Президиума Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь

Редакционная коллегия

А. В. Кильчевский

заместитель Председателя Президиума Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь
(заместитель главного редактора)

Т. П. Петрович

(ведущий редактор журнала)

С. В. Абламейко – Белорусский государственный университет, Республика Беларусь

П. А. Витязь – Президиум Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь

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

С. В. Гапоненко – Белорусский республиканский фонд фундаментальных исследований, Республика Беларусь

А. Я. Григорьев – Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого Национальной академии
наук Беларуси, Республика Беларусь

С. В. Губкин – Институт физиологии Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь

А. Е. Дайнеко – Белорусский национальный технический университет, Республика Беларусь

Н. Желев – Абертейский университет, Соединенное Королевство Великобритании и Северной Ирландии

В. Г. Залесский – Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь

А. И. Иванец – Министерство образования Республики Беларусь, Республика Беларусь

Н. С. Казак – Научно-производственное объединение «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»,
Республика Беларусь

Н. Н. Казанский – Институт лингвистических исследований Российской академии наук, Российская Федерация

С. П. Карпов – Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Российская Федерация

С. Я. Килин – Президиум Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь

(заместитель главного редактора)

А. А. Коваленя – Президиум Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь

В. И. Корзюк – Белорусский государственный университет, Республика Беларусь

В. В. Лапа – Институт почвоведения и агрохимии Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь

М. Ларссон – Университетский научный центр Алба Нова Стокгольмского университета, Королевство Швеция

- А. П. Ласковнев** – Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь
В. Ф. Логинов – Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь
Г. Маркрам – Институт мозга, Центр неврологии и технологии Швейцарского федерального института технологий, Швейцария
А. А. Махнач – Институт геологии, Республика Беларусь
А. Г. Наумовец – Институт физики Национальной академии наук Украины, Украина
В. А. Орлович – Институт физики им. Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь
В. Н. Пармон – Российская академия наук, Российская Федерация
О. Г. Пенязьков – Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь
И. Д. Рашаль – Институт биологии Латвийского университета, Латвийская Республика
Б. А. Ривжа – Латвийская академия сельскохозяйственных и лесных наук, Латвийская Республика
В. А. Садовничий – Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Российская Федерация
А. М. Сергеев – Российская академия наук, Российская Федерация
Н. С. Сердюченко – Президиум Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь
В. И. Торчик – Президиум Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь
А. В. Тузиков – Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь
Тяу Ван Минь – Вьетнамская академия наук и технологий, Социалистическая Республика Вьетнам
С. А. Усанов – Президиум Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь
Ю. С. Харин – Научно-исследовательский институт прикладных проблем математики и информатики, Республика Беларусь
Л. В. Хотылева – Институт генетики и цитологии Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь
А. Цайлингер – Австрийская академия наук, Австрийская Республика
С. А. Чижик – Президиум Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь
(*заместитель главного редактора*)
И. П. Шейко – Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по животноводству, Республика Беларусь
В. И. Янчевский – Институт математики Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь

Адрес редакции:

*ул. Академическая, 1, к. 119, 220072, Минск, Республика Беларусь.
Тел.: +375 17 272-19-19; e-mail: doklady_nanb@mail.ru
doklady.belnauka.by*

ДОКЛАДЫ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ. 2022. Т. 66. № 3

Выходит на русском, белорусском и английском языках

Редактор Т. П. Петрович
Компьютерная верстка Н. И. Кашуба

Сдано в набор 13.06.2022. Выпуск в свет 28.06.2022. Формат 60×84¹/₈. Бумага офсетная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 14,88. Уч.-изд. л. 16,4. Тираж 142 экз. Заказ 108.

Цена: индивидуальная подписка – 12,67 руб.; ведомственная подписка – 29,77 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, 220141, г. Минск.

© РУП «Издательский дом «Беларуская навука».
Доклады НАН Беларуси, 2022

DOKLADY OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS

MINSK. BELARUSKAYA NAVUKA. 2022. Vol. 66. No. 3

Published bimonthly

The journal has been published since July, 1957

Founder – 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. 387.

*The journal included in the List of Journal for Publication of the Results of Dissertation Research
in the Republic of Belarus and in the Database of Russian Science Citation Index (RSCI)*

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

Vladimir G. Gusakov

Chairman of the Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus

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

Alexander V. Kilchevsky

Vice Chairman of the Presidium of the National Academy of Sciences
of Belarus, Republic of Belarus (*Associate Editor-in-Chief*)

Tatiana P. Petrovich

(*Lead editor*)

Sergey V. Ablameyko – Belarusian State University, Republic of Belarus

Chau Van Minh – Vietnam Academy of Science and Technology, Vietnam

Sergey A. Chizhik – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus

(*Associate Editor-in-Chief*)

Alexey Ye. Dayneko – Belarusian National Technical University, Republic of Belarus

Sergey V. Gaponenko – Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research, Republic of Belarus

Andrey Ya. Grigoriev – Institute of Mechanics of Metal-Polymeric Systems named after V. A. Bely of the National
Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus

Sergey V. Gubkin – Institute of Physiology of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus

Andrei I. Ivanets – Ministry of education of the Republic of Belarus, Republic of Belarus

Sergey P. Karpov – Lomonosov Moscow State University, Russian Federation

Nikolay S. Kazak – State Research and Production Association “Optics, Optoelectronics and Laser Technics”,
Republic of Belarus

Nikolay N. Kazansky – Institute for Linguistic Studies of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation

Yuri S. Kharin – Research Institute of Applied Problems of Mathematics and Informatics, Republic of Belarus

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

Sergey Ya. Kilin – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus

(*Associate Editor-in-Chief*)

Viktor I. Korzuyk – Belarusian State University, Republic of Belarus

Alexander A. Kovalenya – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus
Vitaly V. Lapa – Institute for Soil Science and Agrochemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus
Mats Larsson – Alba Nova University Center of the University of Stockholm, Sweden
Alexander P. Laskovnev – Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus
Vladimir F. Loginov – Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus
Anatoly A. Makhnach – Institute of Geology, Republic of Belarus
Henry Markram – Brain Institute, Center for Neurology and Technology of the Swiss Federal Institute of Technology, Switzerland
Anton G. Naumovets – Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Ukraine
Valentin A. Orlovich – B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus
Valentin N. Parmon – Russian Academy of Sciences, Russian Federation
Oleg G. Penyazkov – A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus
Isaak D. Rashal – Institute of Biology of the University of Latvia, Latvia
Baiba A. Rivza – Latvian Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Latvia
Viktor A. Sadovnichiy – Lomonosov Moscow State University, Russian Federation
Nikolay S. Serdyuchenko – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus
Alexander M. Sergeev – Russian Academy of Sciences, Russian Federation
Ivan P. Sheyko – Scientific and Practical Center for Animal Breeding, Republic of Belarus
Vladimir I. Torchik – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus
Alexander V. Tuzikov – United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus
Sergey A. Usanov – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus
Petr A. Vityaz – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus
Igor D. Volotovskiy – Institute of Biophysics and Cell Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus
Vitali G. Zaleski – Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus
Anton Zeilinger – Austrian Academy of Sciences, Austria
Nikolas Zhelev – Abertay University, United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland

Address of the Editorial Office:

1, Akademicheskaya Str., room 119, 220072, Minsk, Republic of Belarus.

Phone: +375 17 272-19-19; e-mail: doklady_nanb@mail.ru

doklady.belnauka.by

DOKLADY OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS. 2022. Vol. 66. No. 3

Printed in Russian, Belarusian and English languages

Editor T. P. Petrovich
Computer Imposition N. I. Kashuba

Sent for press 13.06.2022. Output 28.06.2022. Format 60×84¹/₈. Offset paper.
Digital press. Printed sheets 14,88. Publisher's signatures 16,4. Circulation 142 copies. Order 108.
Price: individual subscription – 12.67 BYN, departmental subscription – 29.77 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.
40, F. Skorina Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus.

© RUE "Publishing House "Belaruskaya Navuka".
Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus, 2022

СОДЕРЖАНИЕ

МАТЕМАТИКА

- Корзюк В. И., Рудько Я. В.** Метод отражений для уравнения Клейна–Гордона (на англ. яз.) 263
- Супруненко И. Д.** Минимальные многочлены образов унипотентных элементов непростого порядка в неприводимых представлениях алгебраической группы типа F_4 (на англ. яз.) 269

ИНФОРМАТИКА

- Гринчук П. С., Фисенко С. П., Шнип А. И.** Математическое моделирование влияния вакцинации на распространение эпидемии COVID-19 274

ФИЗИКА

- Кравченко В. М., Конойко А. И., Кузьмицкая А. С., Малютина-Бронская В. В.** Перспективы применения микрорезонаторов Фабри–Перо для тепловизионной техники 280

ХИМИЯ

- Логвинович А. С., Свиридова Т. В., Скорб Е. В., Свиридов Д. В., Агабеков В. Е.** Создание pH-чувствительных антикоррозионных контейнерных систем на основе частиц интеркалированного азолом оксида молибдена с олигооксометаллатной оболочкой 287

БИОЛОГИЯ

- Моссэ И. Б., Кухтинская Л. В., Седляр Н. Г., Докукина Т. В., Кильчевский А. В.** Роль полиморфных вариантов генов дофаминергической системы в формировании психоэмоционального статуса человека 294
- Кипень В. Н., Снытков Е. В., Михайлова М. Е., Шейко Р. И.** Дифференциация пород домашних свиней с использованием расширенного биоинформатического анализа SNP 301
- Суховеева С. В., Кабачевская Е. М., Волотовский И. Д.** Гравиметрический анализ полисахаридного состава стебля томата на фоне действия гравитационного и фитогормонального сигналов 310
- Кантор К. В., Проскурнина И. А., Сверчкова Н. В., Коломиец Э. И.** Анализ антимикробных метаболитов бактерий *Bacillus amyloliquefaciens* БИМ В-1125 – основы биопрепарата Бакто-хелс 321

МЕДИЦИНА

- Титов Л. П., Трусевич М. О., Горбич Ю. Л.** Роль клеток системы мононуклеарных фагоцитов и регуляторных Т-лимфоцитов в формировании состояния иммуносупрессии при сепсисе 330

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

- Логинов В. Ф., Данилович И. С., Китаев Л. М., Акентьева Е. М.** Современные и ожидаемые гидроклиматические изменения в бассейнах Балтийского и Арктических морей в пределах территорий Беларуси и России 338

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Аль-Камали М. Ф. С. Х., Бойко А. А., Аль-Шаамири Х. А. С.** Мишени $\text{SiO}_2:\text{CuO}$ (Cu^0) для нанесения тонких пленок ионно-лучевым распылением, полученные золь-гель методом 348
- Рубаник В. В., Царенко Ю. В., Вонг Дж. Т., Ли Ю. В.** Влияние ультразвуковой обработки на механические свойства металлов, подвергнутых интенсивной пластической деформации 356
- Жорник В. И., Григорьева Т. Ф., Ковалева С. А., Киселева Т. Ю., Девяткина Е. Т., Восмериков С. В., Веремей И. С., Ляхов Н. З.** Механически стимулированные реакции в системах металл–оксид (карбид) 365

АГРАРНЫЕ НАУКИ

- Соляник А. Н., Шейко И. П., Ходосовский Д. Н., Хоченков А. А., Петрушко А. С., Рудаковская И. И., Безмен В. А., Джумкова М. В.** Изучение преобладающих видов активности у маточного поголовья свиней в условиях промышленной технологии 377

CONTENTS*MATHEMATICS*

- Korzyuk V. I., Rudzko J. V.** Method of reflections for the Klein–Gordon equation 263
- Suprunenko I. D.** Minimal polynomials of the images of the unipotent elements of non-prime order in the irreducible representations of an algebraic group of type F_4 269

INFORMATICS

- Grinchuk P. S., Fisenko S. P., Shnip A. I.** Mathematical modeling of the vaccination influence on the COVID-19 epidemic propagation 274

PHYSICS

- Kravchenko V. M., Konoiko A. I., Kuzmickaya A. S., Malyutina-Bronskaya V. V.** Prospects for the application of Fabry–Perot microresonators for thermal imaging equipment 280

CHEMISTRY

- Logvinovich A. S., Sviridova T. V., Skorb E. V., Sviridov D. V., Agabekov V. E.** Creating the pH-sensitive corrosion-inhibiting container structures based on the azole-intercalated molybdenum oxide particles with oligooxo-metalate shell 287

BIOLOGY

- Mosse I. B., Kukhtinskaya L. V., Sedliar N. G., Dokukina T. V., Kilchevsky A. V.** Role of the gene polymorphic variants of the dopaminergic system in the formation of the human psycho-emotional status 294
- Kipin V. N., Snytkov E. V., Mikhailova M. E., Sheyko R. I.** Breed differentiation of domestic pigs using SNP – extended bioinformatical analysis 301
- Sukhaveyeva S. V., Kabachevskaya A. M., Volotovskiy I. D.** Gravimetric analysis of tomato stems in the perception of a gravitational signal 310
- Kantor K. V., Proskurnina I. A., Sverchkova N. V., Kolomiets E. I.** Analysis of antimicrobial metabolites of bacteria *Bacillus amyloliquefaciens* BIM B-1125 – the basis of Bacto-health biological preparation 321

MEDICINE

- Titov L. P., Trusevich M. O., Gorbich Y. L.** Role of the cells of the system of mononuclear phagocytes and regulatory T-lymphocytes in the formation of the state of immunosuppression in sepsis 330

EARTH SCIENCES

- Loginov V. F., Danilovich I. S., Kitaev L. V., Akent'eva E. M.** Current and projected hydroclimatic changes in the Baltic and Arctic sea basins in the territories of Belarus and Russia 338

TECHNICAL SCIENCES

- Al-Kamali M. F. S. H., Boika A. A., Al-Shamiri H. A. S.** SiO_2 : CuO (Cu^0) targets for depositing thin films of ion-beam spraying obtained by sol-gel method 348
- Rubanik V. V., Tsarenko Yu. V., Wang J. T., Liu Yu W.** Influence of ultrasonic processing on the mechanical properties of metals subjected to intense plastic deformation 356
- Zhornik V. I., Grigoreva T. F., Kovaliova S. A., Kiseleva T. Yu., Devyatkina E. T., Vosmerikov S. V., Veremey I. S., Lyakhov N. Z.** Mechanically stimulated reactions in metal–oxide (carbide) systems 365

AGRARIAN SCIENCES

- Solyanik A. N., Sheyko I. P., Hodosovskiy D. N., Khochenkov A. A., Petrushko A. S., Rudakovskaya I. I., Bezmen V. A., Jumkova M. V.** Study of the predominant types of the activity of sows under the on-farm conditions .. 377

ISSN 1561-8323 (Print)
ISSN 2524-2431 (Online)

МАТЕМАТИКА
MATHEMATICS

UDC 517.956.32
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-3-263-268>

Received 17.02.2022
Поступило в редакцию 17.02.2022

Academician Viktor I. Korzyuk^{1,2}, Jan V. Rudzko²

¹*Institute of Mathematics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*
²*Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus*

METHOD OF REFLECTIONS FOR THE KLEIN–GORDON EQUATION

Abstract. Using the method of reflections, the solutions of the first and second mixed problem for the homogenous Klein–Gordon equation in a quarter plane and of the first mixed problem for the homogenous Klein–Gordon equation in a half-strip are written out in an explicit analytical form. The Cauchy conditions of these problems are inhomogeneous, but the Dirichlet boundary condition (or the Neumann boundary condition) is homogeneous. Conditions are formulated, under which the solutions to these problems are classical.

Keywords: Klein–Gordon equation, method of reflections, mixed problem, classical solution

For citation. Korzyuk V. I., Rudzko J. V. Method of reflections for the Klein–Gordon equation. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2022, vol. 66, no. 3, pp. 263–268. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-3-263-268>

Академик В. И. Корзюк^{1,2}, Я. В. Рудзько²

¹*Институт математики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь*
²*Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь.*

МЕТОД ОТРАЖЕНИЙ ДЛЯ УРАВНЕНИЯ КЛЕЙНА–ГОРДОНА

Аннотация. Методом отражений в явном аналитическом виде выписаны решения первой и второй смешанных задач для однородного уравнения Клейна–Гордона в четверти плоскости и первой смешанной задачи для однородного уравнения Клейна–Гордона в полуполосе с неоднородными условиями Коши и однородным условием Дирихле (или условием Неймана). Сформулированы условия, при которых решения данных задач являются классическими.

Ключевые слова: уравнение Клейна–Гордона, метод отражений, смешанная задача, классическое решение

Для цитирования. Корзюк, В. И. Метод отражений для уравнения Клейна–Гордона / В. И. Корзюк, Я. В. Рудзько // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2022. – Т. 66, № 3. – С. 263–268. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-3-263-268>

Introduction. The Klein–Gordon equation describes the dynamics of quantum particles with zero spin and non-zero mass (e. g., Higgs boson, pion, and kaon) at speeds close to the speed of light [1]. Some other equations from mechanics and electrodynamics can be reduced to the Klein–Gordon equation. Such equations include the telegraph equation, which describes the voltage and current on an electrical transmission line with distance and time [2], and a wave equation with damping term, which describes transverse waves of displacement on a string under consideration of the friction [3].

In previous papers, as a rule, solutions of mixed problems for the Klein–Gordon equation in a quarter-plane were either not written out, or it was written out in an implicit analytic form [4; 5], or written out for a particular case of the equation [6]. We also note that in the papers where the solution is written out, the authors usually do only formal construction of the solution [6; 7], wherein the uniqueness and smoothness of the solution are not studied.

In this article, we will use the method of reflections [8; 9] to solve the boundary value problems associated with the Klein–Gordon equation on the half-line $0 < x < \infty$ and the finite interval $0 < x < l$.

The first mixed problem on the half-line. Let us start with the Dirichlet boundary condition first and consider the initial boundary value problem

$$\begin{cases} \partial_t^2 v - a^2 \partial_x^2 v - c^2 v = 0, & 0 < t < \infty, & 0 < x < \infty, \\ v(0, x) = \phi(x), & \partial_t v(0, x) = \psi(x), & x > 0, \\ v(t, 0) = 0, & t > 0. \end{cases} \quad (1)$$

We assume that $a > 0$, $c \in \{(x + iy) \mid (x = 0 \text{ and } y > 0) \text{ or } (x > 0 \text{ and } y = 0)\}$. We reduce the Dirichlet problem (1) to the whole line by the reflection method. The idea is again to extend the initial data, in this case ϕ, ψ , to the whole line, so that the boundary condition is automatically satisfied for the solutions of the Cauchy problem on the whole line with the extended initial data. Since the boundary condition is in the Dirichlet form, one must take the odd extensions

$$\phi_{\text{odd}}(x) = \begin{cases} \phi(x), & x > 0, \\ 0, & x = 0, \\ -\phi(-x), & x < 0; \end{cases} \quad \psi_{\text{odd}}(x) = \begin{cases} \psi(x), & x > 0, \\ 0, & x = 0, \\ -\psi(-x), & x < 0. \end{cases} \quad (2)$$

Consider the Cauchy problem on the whole line with the extended initial data

$$\begin{cases} \partial_t^2 u - a^2 \partial_x^2 u - c^2 u = 0, & 0 < t < \infty, & -\infty < x < \infty, \\ u(0, x) = \phi_{\text{odd}}(x), & \partial_t u(0, x) = \psi_{\text{odd}}(x), & -\infty < x < \infty. \end{cases} \quad (3)$$

We know the solution to the problem (3) in an exact analytical form [10]

$$\begin{aligned} u(t, x) = & \frac{\phi_{\text{odd}}(x + at) + \phi_{\text{odd}}(x - at)}{2} + \frac{1}{2a} \int_{x-at}^{x+at} I_0 \left(\frac{c}{a} \sqrt{a^2 t^2 - (\xi - x)^2} \right) \psi_{\text{odd}}(\xi) d\xi + \\ & + \frac{ct}{2} \int_{x-at}^{x+at} \frac{1}{\sqrt{a^2 t^2 - (\xi - x)^2}} I_1 \left(\frac{c}{a} \sqrt{a^2 t^2 - (\xi - x)^2} \right) \phi_{\text{odd}}(\xi) d\xi. \end{aligned} \quad (4)$$

It is obvious that $u(t, 0) = 0$. Then defining the restriction of $u(x, t)$ to the positive half-line $x \geq 0$,

$$v(t, x) = u(t, x) \Big|_{x \geq 0} \quad (5)$$

we automatically have that $v(0, t) = u(0, t) = 0$. So the boundary condition of the Dirichlet problem (1) is satisfied for v . The initial conditions are satisfied as well since the restrictions of ϕ_{odd} and ψ_{odd} to the positive half-line are ϕ and ψ respectively. Finally, v solves the Klein–Gordon equation for $x > 0$ since u satisfies the Klein–Gordon equation for all $x \in \mathbb{R}$, and in particular for $x > 0$. Thus, v defined by (5) is a solution to the Dirichlet problem (1). The solution must be unique since the odd extension of the solution will solve the Cauchy problem (3), and therefore must be unique.

Using generalized d'Alembert's formula (4) for the solution of (3), and taking the restriction (5), we have that for $x \geq 0$,

$$\begin{aligned} v(t, x) = & \frac{\phi_{\text{odd}}(x + at) + \phi_{\text{odd}}(x - at)}{2} + \frac{1}{2a} \int_{x-at}^{x+at} I_0 \left(\frac{c}{a} \sqrt{a^2 t^2 - (\xi - x)^2} \right) \psi_{\text{odd}}(\xi) d\xi + \\ & + \frac{ct}{2} \int_{x-at}^{x+at} \frac{1}{\sqrt{a^2 t^2 - (\xi - x)^2}} I_1 \left(\frac{c}{a} \sqrt{a^2 t^2 - (\xi - x)^2} \right) \phi_{\text{odd}}(\xi) d\xi, \quad t > 0, \quad x > 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Notice that if $x \geq 0$ and $t > 0$, then $x + at > 0$, and $\phi_{\text{odd}}(x + at) = \phi(x + at)$. If in addition $x - at > 0$, then $\phi_{\text{odd}}(x - at) = \phi(x - at)$, and over the interval $s \in [x - at, x + at]$, $\psi_{\text{odd}}(s) = \psi(s)$. Thus, for $x > at$, we have

$$v(t, x) = \frac{\phi(x + at) + \phi(x - at)}{2} + \frac{1}{2a} \int_{x-at}^{x+at} I_0 \left(\frac{c}{a} \sqrt{a^2 t^2 - (\xi - x)^2} \right) \psi(\xi) d\xi + \frac{ct}{2} \int_{x-at}^{x+at} \frac{1}{\sqrt{a^2 t^2 - (\xi - x)^2}} I_1 \left(\frac{c}{a} \sqrt{a^2 t^2 - (\xi - x)^2} \right) \phi(\xi) d\xi, \quad t > 0, \quad x > 0, \quad x - at > 0. \tag{7}$$

For $0 < x < at$, the argument $x - at < 0$, and using (2) we can rewrite the solution (6) as

$$v(t, x) = \frac{\phi(x + at) - \phi(at - x)}{2} + \frac{ct}{2} \int_0^{x+at} \frac{1}{\sqrt{a^2 t^2 - (\xi - x)^2}} I_1 \left(\frac{c}{a} \sqrt{a^2 t^2 - (\xi - x)^2} \right) \phi(\xi) d\xi + \frac{1}{2a} \int_0^{x+at} I_0 \left(\frac{c}{a} \sqrt{a^2 t^2 - (\xi - x)^2} \right) \psi(\xi) d\xi + \frac{1}{2a} \int_{x-at}^0 -I_0 \left(\frac{c}{a} \sqrt{a^2 t^2 - (\xi - x)^2} \right) \psi(-\xi) d\xi + \frac{ct}{2} \int_{x-at}^0 \frac{-1}{\sqrt{a^2 t^2 - (\xi - x)^2}} I_1 \left(\frac{c}{a} \sqrt{a^2 t^2 - (\xi - x)^2} \right) \phi(-\xi) d\xi, \quad t > 0, \quad x > 0, \quad x - at < 0.$$

Making the change of variables $\xi \mapsto -\xi$, we get

$$v(t, x) = \frac{\phi(x + at) - \phi(at - x)}{2} + \frac{ct}{2} \int_0^{x+at} \frac{1}{\sqrt{a^2 t^2 - (\xi - x)^2}} I_1 \left(\frac{c}{a} \sqrt{a^2 t^2 - (\xi - x)^2} \right) \phi(\xi) d\xi + \frac{1}{2a} \int_0^{x+at} I_0 \left(\frac{c}{a} \sqrt{a^2 t^2 - (\xi - x)^2} \right) \psi(\xi) d\xi + \frac{1}{2a} \int_{at-x}^0 I_0 \left(\frac{c}{a} \sqrt{a^2 t^2 - (\xi + x)^2} \right) \psi(\xi) d\xi + \frac{ct}{2} \int_{at-x}^0 \frac{1}{\sqrt{a^2 t^2 - (\xi + x)^2}} I_1 \left(\frac{c}{a} \sqrt{a^2 t^2 - (\xi + x)^2} \right) \phi(\xi) d\xi, \quad t > 0, \quad x > 0, \quad x - at < 0. \tag{8}$$

Theorem 1. Let $\phi \in C^2[0, \infty)$, $\psi \in C^1[0, \infty)$. The first mixed problem (1) has a unique classical solution, represented by the formulas (7), (8), of the class $C^2([0, \infty) \times [0, \infty))$ if and only if $\phi(0) = 0$, $\psi(0) = 0$, $\phi''(0) = 0$.

Proof. From formulas (7) and (8) we conclude that $v \in C^2(\{(t, x) | x \geq 0, t \geq 0, x - at \geq 0\})$ and $v \in C^2(\{(t, x) | x \geq 0, t \geq 0, x - at \leq 0\})$ if $\phi \in C^2[0, \infty)$, $\psi \in C^1[0, \infty)$. So, the condition

$$\partial_t^p \partial_x^k v(t, at - 0) = \partial_t^p \partial_x^k v(t, at + 0), \quad 0 \leq p + k \leq 2, \quad p, k \in \{0, 1, 2\}, \tag{9}$$

must be satisfied to $v \in C^2([0, \infty) \times [0, \infty))$. This condition is fulfilled if $\phi(0) = 0$, $\psi(0) = 0$, $\phi''(0) = 0$. If $v \in C^2([0, \infty) \times [0, \infty))$ then condition (9) is satisfied. This entails equalities $\phi(0) = 0$, $\psi(0) = 0$, $\phi''(0) = 0$.

The second mixed problem on the half-line. For the Neumann problem on the half-line,

$$\begin{cases} \partial_t^2 w - a^2 \partial_x^2 w - c^2 w = 0, & 0 < t < \infty, \quad 0 < x < \infty, \\ w(0, x) = \phi(x), \quad \partial_t v(0, x) = \psi(x), & x > 0, \\ \partial_x w(t, 0) = 0, & t > 0. \end{cases} \tag{10}$$

As in the previous problem, we assume that $a > 0$, $c \in \{(x + iy) | (x = 0 \text{ and } y > 0) \text{ or } (x > 0 \text{ and } y = 0)\}$. We use the reflection method with even extensions to reduce the problem to the Cauchy problem on the whole line. Define the even extensions of the initial data

$$\phi_{\text{even}}(x) = \begin{cases} \phi(x), & x > 0, \\ \phi(-x), & x < 0; \end{cases} \quad \Psi_{\text{even}}(x) = \begin{cases} \psi(x), & x > 0, \\ \psi(-x), & x < 0, \end{cases} \quad (11)$$

and consider the following Cauchy problem on the whole line

$$\begin{cases} \partial_t^2 u - a^2 \partial_x^2 u - c^2 u = 0, & 0 < t < \infty, \quad 0 < x < \infty, \\ u(0, x) = \phi_{\text{even}}(x), \quad \partial_t u(0, x) = \Psi_{\text{even}}(x), & -\infty < x < \infty. \end{cases} \quad (12)$$

The solution u to the problem (12) will satisfy $u'_x(0, t) = 0$ for all $t > 0$. Similar to the case of the Dirichlet problem, the restriction $w(t, x) = u(t, x)|_{x \geq 0}$ will be the unique solution to the Neumann problem (10).

Using generalized d'Alembert's formula for the solution u of (12), and taking the restriction to $x \geq 0$, we obtain

$$\begin{aligned} v(t, x) = & \frac{\phi_{\text{even}}(x+at) + \phi_{\text{even}}(x-at)}{2} + \frac{1}{2a} \int_{x-at}^{x+at} I_0 \left(\frac{c}{a} \sqrt{a^2 t^2 - (\xi-x)^2} \right) \Psi_{\text{even}}(\xi) d\xi + \\ & + \frac{ct}{2} \int_{x-at}^{x+at} \frac{1}{\sqrt{a^2 t^2 - (\xi-x)^2}} I_1 \left(\frac{c}{a} \sqrt{a^2 t^2 - (\xi-x)^2} \right) \phi_{\text{even}}(\xi) d\xi, \quad t > 0, \quad x > 0. \end{aligned} \quad (13)$$

Again it is necessary to consider the two cases $x > at$ and $0 < x < at$ separately. Using the definitions (11), the solution (13) can be written as

$$\begin{aligned} v(t, x) = & \frac{\phi(x+at) + \phi(x-at)}{2} + \frac{1}{2a} \int_{x-at}^{x+at} I_0 \left(\frac{c}{a} \sqrt{a^2 t^2 - (\xi-x)^2} \right) \psi(\xi) d\xi + \\ & + \frac{ct}{2} \int_{x-at}^{x+at} \frac{1}{\sqrt{a^2 t^2 - (\xi-x)^2}} I_1 \left(\frac{c}{a} \sqrt{a^2 t^2 - (\xi-x)^2} \right) \phi(\xi) d\xi, \quad x > 0, \quad t > 0, \quad x-at > 0, \\ v(t, x) = & \frac{\phi(x+at) + \phi(at-x)}{2} + \frac{ct}{2} \int_0^{x+at} \frac{1}{\sqrt{a^2 t^2 - (\xi-x)^2}} I_1 \left(\frac{c}{a} \sqrt{a^2 t^2 - (\xi-x)^2} \right) \phi(\xi) d\xi + \\ & + \frac{1}{2a} \int_0^{x+at} I_0 \left(\frac{c}{a} \sqrt{a^2 t^2 - (\xi-x)^2} \right) \psi(\xi) d\xi + \frac{1}{2a} \int_0^{at-x} I_0 \left(\frac{c}{a} \sqrt{a^2 t^2 - (\xi+x)^2} \right) \psi(\xi) d\xi + \\ & + \frac{ct}{2} \int_0^{at-x} \frac{1}{\sqrt{a^2 t^2 - (\xi+x)^2}} I_1 \left(\frac{c}{a} \sqrt{a^2 t^2 - (\xi+x)^2} \right) \phi(\xi) d\xi, \quad x > 0, \quad t > 0, \quad x-at < 0. \end{aligned} \quad (14)$$

Theorem 2. Let $\phi \in C^2[0, \infty)$, $\psi \in C^1[0, \infty)$. The second mixed problem (10) has the unique classical solution, represented by the formula (14), of the class $C^2([0, \infty) \times [0, \infty))$ if and only if $\phi'(0) = 0$, $\psi'(0) = 0$.

Proof. To prove this theorem, it needs to repeat the proof of Theorem 1.

The first mixed problem on a finite interval. We would like to apply the same method to the boundary value problems on the finite interval, which corresponds to the physical case of a potential well. Consider the Dirichlet problem on the finite line

$$\begin{cases} \partial_t^2 v - a^2 \partial_x^2 v - c^2 v = 0, & 0 < t < \infty, \quad 0 < x < l, \\ v(0, x) = \phi(x), \quad \partial_t v(0, x) = \psi(x), & x > 0, \\ v(t, 0) = v(t, l) = 0, & t > 0. \end{cases} \quad (15)$$

The homogeneous Dirichlet conditions correspond to the quantum particle in a box model (infinite potential well).

Recall that the idea of the reflection method is to extend the initial data to the whole line in such a way, that the boundary conditions are automatically satisfied. For the homogeneous Dirichlet data the appropriate choice is the odd extension. In this case, we need to extend the initial data ϕ, ψ , which are defined only on the interval $0 < x < l$, in such a way that the resulting extensions are odd with respect to both $x = 0$, and $x = l$. That is, the extensions must satisfy

$$f(-x) = -f(x) \text{ and } f(l-x) = -f(l+x). \tag{16}$$

Notice that for such a function $f(0) = -f(0)$ from the first condition, and $f(l) = -f(l)$ from the second condition, hence, $f(0) = f(l) = 0$. Subsequently, boundary conditions will be automatically satisfied for the solution to the Cauchy problem with such data. Notice that the conditions (16) imply functions that are odd with respect to both $x = 0$ and $x = l$ satisfy $f(2l+x) = -f(-x) = f(x)$, which means that such functions must be $2l$ -periodic. Using this we can define the extensions of the initial data ϕ, ψ as

$$\phi_{\text{ext}}(x) = \begin{cases} \phi(x), & 0 < x < l, \\ -\phi(-x), & -l < x < 0, \\ \text{extended to be } 2l\text{-periodic,} \end{cases} \quad \psi_{\text{ext}}(x) = \begin{cases} \psi(x), & 0 < x < l, \\ -\psi(-x), & -l < x < 0, \\ \text{extended to be } 2l\text{-periodic.} \end{cases}$$

Now, consider the Cauchy problem on the whole line with the extended initial data

$$\begin{cases} \partial_t^2 u - a^2 \partial_x^2 u - c^2 u = 0, & 0 < t < \infty, \quad 0 < x < \infty, \\ u(0, x) = \phi_{\text{ext}}(x), \quad \partial_t u(0, x) = \psi_{\text{ext}}(x), & -\infty < x < \infty. \end{cases} \tag{17}$$

By generalized d'Alembert's formula, the solution of (17) will be given as

$$\begin{aligned} u(t, x) = & \frac{\phi_{\text{ext}}(x+at) + \phi_{\text{ext}}(x-at)}{2} + \frac{1}{2a} \int_{x-at}^{x+at} I_0 \left(\frac{c}{a} \sqrt{a^2 t^2 - (\xi-x)^2} \right) \psi_{\text{ext}}(\xi) d\xi + \\ & + \frac{ct}{2} \int_{x-at}^{x+at} \frac{1}{\sqrt{a^2 t^2 - (\xi-x)^2}} I_1 \left(\frac{c}{a} \sqrt{a^2 t^2 - (\xi-x)^2} \right) \phi_{\text{ext}}(\xi) d\xi, \quad t > 0, \quad x > 0. \end{aligned} \tag{18}$$

From (18) we automatically have $u(0, t) = u(l, t) = 0$, and the restriction

$$v(t, x) = u(t, x) |_{0 \leq x \leq l} \tag{19}$$

will solve the boundary value problem (15).

Theorem 3. *Let $\phi \in C^2[0, \infty)$, $\psi \in C^1[0, \infty)$. The first mixed problem (15) has a unique classical solution, represented by the formulas (18), (19), of the class $C^2([0, \infty) \times [0, l])$ if and only if $\phi(0) = 0$, $\psi(0) = 0$, $\phi''(0) = 0$, $\phi(l) = 0$, $\psi(l) = 0$, $\phi''(l) = 0$.*

Proof. See [4].

Conclusion. We derived the solutions to the Klein–Gordon equation on the half-line in much the same way as was done for the wave equation and the heat equation [8; 9]. That is, we reduced the initial/boundary value problem to the Cauchy problem over the whole line through the appropriate extension of the initial data. The solutions are obtained in an explicit analytical form. The necessary and sufficient conditions for the existence and uniqueness of classical solutions are derived. It is planned to apply the method of reflections to other partial differential equations in further research.

References

1. Bethe H. A., Jackiw R. *Intermediate Quantum Mechanics*. 3rd ed. Boulder: Westview Press, 1997. 416 p.
2. Bell J. *Transmission Line Equation (Telegrapher's Equation) and Wave Equations of Higher Dimension*. 9 p. Available at: http://www.math.umbc.edu/~jbell/pde_notes/07_Telegrapher%20Equation.pdf (accessed 10 April 2022).
3. Vajiac M., Tolosa J. *An Introduction to Partial Differential Equations in the Undergraduate Curriculum. Lecture 7: The Wave Equation*. 16 p. Available at: <https://www.math.hmc.edu/~ajb/PCMI/lecture7.pdf> (accessed 10 April 2022).

4. Korzyuk V. I., Stolyarchuk I. I. Classical solution of the first mixed problem for the Klein–Gordon–Fock equation in a half-strip. *Differential Equations*, 2014, vol. 50, no. 8, pp. 1098–1111. <https://doi.org/10.1134/s0012266114080084>
5. Korzyuk V. I., Rudzko J. V. Classical solution of the first mixed problem for the telegraph equation with a nonlinear potential. *Differential Equations*, 2022, vol. 58, no. 2, pp. 175–186. <https://doi.org/10.1134/S0012266122020045>
6. Pikulin V. P., Pohozaev S. I. *Equations in Mathematical Physics: A practical course*. Basel, Springer, 2001. 207 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-0348-0268-0>
7. Giusti A. *Dispersive Wave Solutions of the Klein–Gordon equation in Cosmology*. Università di Bologna, 2013. 64 p. Available at: <http://amslaurea.unibo.it/6148/> (accessed 10 April 2022).
8. Grigoryan V. *Waves on the half-line*, 2011. Available at: <http://web.math.ucsb.edu/~grigoryan/124A/lecs/lec13.pdf> (accessed 10 April 2022).
9. Grigoryan V. *Partial Differential Equations*. Santa Barbara: Department of Mathematics, University of California, Santa Barbara, 2010. 96 p. Available at: <https://web.math.ucsb.edu/~grigoryan/124A.pdf> (accessed 10 April 2022).
10. Polyanin A. D. *Handbook of linear partial differential equations for engineers and scientists*. New York, Chapman & Hall/CRC, 2001. 667 p. <https://doi.org/10.1201/9781420035322>

Information about the authors

Korzyuk Viktor I. – Academician, D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor. Institute of Mathematics of the National Academy of Sciences of Belarus (11, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: korzyuk@bsu.by.

Rudzko Jan V. – M. Sc. (Mathematics and Computer Sciences). Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: janycz@yahoo.com. ORCID: 0000-0002-1482-9106.

Информация об авторах

Корзюк Виктор Иванович – академик, д-р физ.-мат. наук, профессор. Институт математики НАН Беларуси (ул. Сурганова, 11, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: korzyuk@bsu.by.

Рудько Ян Вячеславович – магистр (математика и компьютерные науки). Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: janycz@yahoo.com. ORCID: 0000-0002-1482-9106.

ISSN 1561-8323 (Print)
ISSN 2524-2431 (Online)

UDC 512.554.32
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-3-269-273>

Received 15.04.2022
Поступило в редакцию 15.04.2022

Irina D. Suprunenko

Institute of Mathematics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

**MINIMAL POLYNOMIALS OF THE IMAGES OF THE UNIPOTENT ELEMENTS
OF NON-PRIME ORDER IN THE IRREDUCIBLE REPRESENTATIONS
OF AN ALGEBRAIC GROUP OF TYPE F_4**

(Communicated by Academician Vyacheslav I. Yanchevsky)

Abstract. The minimal polynomials of the images of the unipotent elements of non-prime order in the irreducible representations of an algebraic group of type F_4 in characteristics 3 and 7 are found. This completes the solution of the minimal polynomial problem for unipotent elements in the irreducible representations of such a group in an odd characteristic.

Keywords: an algebraic group of type F_4 , unipotent elements, irreducible representations

For citation. Suprunenko I. D. Minimal polynomials of the images of the unipotent elements of non-prime order in the irreducible representations of an algebraic group of type F_4 . *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2022, vol. 66, no. 3, pp. 269–273. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-3-269-273>

И. Д. Супруненко

Институт математики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

**МИНИМАЛЬНЫЕ МНОГОЧЛЕНЫ ОБРАЗОВ УНИПОТЕНТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НЕПРОСТОГО
ПОРЯДКА В НЕПРИВОДИМЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЯХ АЛГЕБРАИЧЕСКОЙ ГРУППЫ ТИПА F_4**

(Представлено академиком В. И. Янчевским)

Аннотация. Найдены минимальные многочлены образов унипотентных элементов непростого порядка в неприводимых представлениях алгебраической группы типа F_4 в характеристиках 3 и 7. Это завершает решение задачи о минимальных многочленах унипотентных элементов в неприводимых представлениях такой группы в нечетной характеристике.

Ключевые слова: алгебраическая группа типа F_4 , унипотентные элементы, неприводимые представления

Для цитирования. Супруненко, И. Д. Минимальные многочлены образов унипотентных элементов непростого порядка в неприводимых представлениях алгебраической группы типа F_4 / И. Д. Супруненко // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2022. – Т. 66, № 3. – С. 269–273. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-3-269-273>

Introduction. The investigation of the minimal polynomial problem for the images of unipotent elements in irreducible representations of the simple algebraic groups is continued. In this paper the problem is solved for unipotent elements of non-prime order and irreducible representations of an algebraic group of type F_4 in characteristics 3 and 7. Earlier this problem has been solved for unipotent elements of prime order and all simple algebraic groups [1], for unipotent elements of non-prime order and irreducible representations of the classical algebraic groups in an odd characteristic [2], and for such elements in exceptional groups in certain characteristics [3]. In [3] the following cases are settled: the groups of types E_6 in characteristic at least 5, the groups of type E_7 in characteristics 5, 7, and 17, the groups of type E_8 in characteristics 7 and 29, the groups of type F_4 in characteristics 5 and 11, and the groups of type G_2 in all characteristics. As the groups of type F_4 have unipotent elements of non-prime order only in characteristics at most 11, now for these groups the minimal polynomial problem is completely solved in all odd characteristics.

The minimal polynomials of the images of individual elements in representations yield important invariants of these representations useful for solving problems on recognizing representations and linear groups by the presence of particular matrices. Results on these polynomials proven for irreducible representations of algebraic groups can be immediately transferred to absolutely irreducible representations of finite Chevalley groups in the defining characteristic what increases the range of their potential

applications. Therefore such results can be regarded as a contribution to the programme of extending the fundamental results of Hall and Higman [4] on the minimal polynomials of p -elements in finite irreducible p -solvable linear groups in characteristic p to groups that are not p -solvable. In [2] one can find a short discussion of some results on the minimal polynomial problem for irreducible representations of finite groups close to simple.

The main part. In what follows \mathbb{C} is the complex field, K is an algebraically closed field of an odd characteristic p , \mathbb{Z} and \mathbb{Z}^+ are the sets of integers and nonnegative integers, respectively, $G = F_4(K)$, $G_{\mathbb{C}} = F_4(\mathbb{C})$, ω_i , $1 \leq i \leq 4$, are the fundamental weights of G , $\omega(\varphi)$ is the highest weight of a representation φ . For an element x and a representation ρ of some algebraic group, the symbol $d_{\rho}(x)$ denotes the degree of the minimal polynomial of $\rho(x)$; $|x|$ is the order of x ; $\langle \mu, \alpha \rangle$ is the value of a weight μ on a root α (the canonical pairing in the sense of [5, Section 1]). If φ is an irreducible representation of G , then $\varphi_{\mathbb{C}}$ is the irreducible representation of $G_{\mathbb{C}}$ with highest weight $\omega(\varphi)$. There exists a canonical bijection f from the set of unipotent conjugacy classes of G onto the analogical set for $G_{\mathbb{C}}$ determined with the help of the distinguished parabolic subgroups in the Levi subgroups of G (see, for instance, comments in the Introduction of [6]). In what follows if $x \in G$ is a unipotent element from a class C , then $x_{\mathbb{C}} \in f(C) \subset G_{\mathbb{C}}$. Recall that an irreducible representation of a semisimple algebraic group over K is p -restricted if all coefficients of its highest weight are less than p .

It is clear that the minimal polynomial of the image of a unipotent element in a rational representation of an algebraic group has the form $(t - 1)^d$ and hence is completely determined by its degree. It is well known that the maximal order of a unipotent element in G is equal to 27 for $p = 3$ and to 49 for $p = 7$; if $p = 3$, only regular unipotent elements have order 27, other unipotent elements have smaller orders and are conjugate to elements from proper subsystem subgroups of G whose simple components are classical groups; for $p = 7$, the group G has two conjugacy classes of elements of order 49: regular unipotent elements and the class containing regular unipotent elements of a subsystem subgroup of type B_4 (see, for instance, [6]).

In what follows φ is a nontrivial irreducible representation of G with highest weight ω and M is a module affording φ .

Theorem 1. *Let $p = 3$, $x \in G$, and $|x| = 9$. Then $d_{\varphi}(x) = 9$ or one of the following holds:*

1) $\omega = 3\omega_4$, x is conjugate to a regular unipotent element from a subsystem subgroup with a simple component of type C_2 , and $d_{\varphi}(x) = 5$;

2) $\omega = 3\omega_4$, x is conjugate to a regular unipotent element from a subsystem subgroup of type B_3 , and $d_{\varphi}(x) = 7$;

3) $\omega = 3\omega_1$, x is such as in Item 1), and $d_{\varphi}(x) = 7$;

4) $\omega = 3\omega_3$, x is such as in Item 2), and $d_{\varphi}(x) = 8$ (here j is a nonnegative integer).

There are 3 conjugacy classes in G that satisfy the assumptions of Item 1) of Theorem 1. Regular unipotent elements from subsystem subgroups of types C_2 , $C_2 \times C_1$, and $C_2 \times C_1 \times C_1$ are their representatives.

Theorem 2. *Let $p = 3$ and $x \in G$ be a regular unipotent element. Then $d_{\varphi}(x) = 27$ for $\omega(\varphi) \notin \{3\omega_1, 3\omega_4\}$, $d_{\varphi}(x) = 19$ for $\omega(\varphi) = 3\omega_1$, and $d_{\varphi}(x) = 15$ for $\omega(\varphi) = 3\omega_4$ (here j is a nonnegative integer).*

Theorem 3. *Let $p = 7$, $x \in G$ be a regular unipotent element, and $z \in G$ be such element of a subsystem subgroup of type B_4 . Assume that φ is p -restricted. Then*

$$d_{\varphi}(g) = \min\{d_{\varphi_{\mathbb{C}}}(g_{\mathbb{C}}), 7d_{\varphi}(g^7), 49\}$$

for $g = x$ or z . In particular, $d_{\varphi}(z) = d_{\varphi_{\mathbb{C}}}(z_{\mathbb{C}})$ for

$$\omega \in \{\omega_i, 1 \leq i \leq 4, 2\omega_1, 3\omega_1, \omega_1 + \omega_j, 2 \leq j \leq 4, 2\omega_1 + \omega_3, 2\omega_1 + \omega_4, \omega_1 + \omega_3 + \omega_4\},$$

$$d_{\varphi}(z) = 7 d_{\varphi}(z^7) \text{ for}$$

$$\omega \in \{a_4\omega_4, 2 \leq a_4 \leq 5, \omega_i + \omega_j, 1 < i < j \leq 4, \omega_k + 2\omega_4, 1 \leq k \leq 3, 2\omega_3, 2\omega_3 + \omega_4, \omega_1 + 3\omega_4, \omega_3 + 3\omega_4\},$$

$$d_{\varphi}(x) = d_{\varphi_{\mathbb{C}}}(x_{\mathbb{C}}) \text{ for } \omega \in \{\omega_i, 1 \leq i \leq 4, 2\omega_1, 2\omega_4, \omega_1 + \omega_4, \omega_3 + \omega_4\},$$

and $d_{\varphi}(g) = 49$ otherwise for $g = x$ or z .

According to [6, Tables A and D], for $p = 7$, the element z^7 is a long root element and x^7 is a product of commuting long and short root elements. Let $\omega = \sum_{i=1}^4 a_i \omega_i$. Applying [1, Theorem 1.1, Proposition 1.3, and Table 4], one can show that

$$d_{\varphi_{\mathbb{C}}}(z_{\mathbb{C}}) = 14a_1 + 26a_2 + 18a_3 + 10a_4 + 1, \quad d_{\varphi_{\mathbb{C}}}(x_{\mathbb{C}}) = 22a_1 + 42a_2 + 30a_3 + 16a_4 + 1,$$

$$d_{\varphi}(z^7) = \min\{7, 1 + 2a_1 + 3a_2 + 2a_3 + a_4\}, \quad d_{\varphi}(x^7) = \min\{7, 1 + 3a_1 + 6a_2 + 4a_3 + 2a_4\}.$$

By the Steinberg tensor product theorem [7, Theorem 1.1], if ρ is an irreducible representation of a semisimple algebraic group over K , then $\rho \cong \otimes_{k=0}^j \rho_k \circ Fr^k$ where all ρ_k are p -restricted and Fr is the Frobenius morphism determined by raising the elements of K to the power p . Set $\omega'(\rho) = \sum_{k=0}^j \omega(\rho_k)$. The weight $\omega'(\rho)$ is uniquely determined. We call an irreducible representation ρ of a simple algebraic group Γ over K p -large if $\langle \omega'(\rho), \beta \rangle \geq p$ for a maximal root β of Γ .

As for other simple algebraic groups and characteristics, when the minimal polynomial problem is solved for p -restricted representations, we can apply the Steinberg tensor product theorem and the formulas for a tensor product of unipotent Jordan blocks from [8] to pass to arbitrary irreducible representations. In particular, if $\varphi = \varphi_1 \otimes \varphi_2$ and $d_{\varphi_1}(x) + d_{\varphi_2}(x) > |x|$ for a unipotent element x , then

$$d_{\varphi}(x) = |x|. \tag{1}$$

Theorems 1, 2, 3, the results of [3] on the minimal polynomials of the images of unipotent elements in irreducible representations of $F_4(K)$ in characteristics 5 and 11, and those of [1] on analogous polynomials for elements of order p imply

Theorem 4. *For a p -large representation φ of the group $F_4(K)$ in an odd characteristic p , the degree $d_{\varphi}(x) = |x|$ for each unipotent element x .*

We need some more notation. In what follows Γ is a simply connected simple algebraic group over K , $\Lambda(\Gamma)$, $\Lambda^+(\Gamma)$, $R(\Gamma)$, and $R^+(\Gamma)$, respectively, are the sets of weights, dominant weights, roots, and positive roots of Γ , r is the rank of Γ , $\Pi(\Gamma) = \{\alpha_1, \dots, \alpha_r\}$ is a basis in $R(\Gamma)$; \mathcal{X}_{β} and $x_{\beta}(t)$ are the root subgroup and the root element of Γ associated with a root β and an element t of the field; $\overline{cl(x)}$ is the Zariski closure of the conjugacy class containing an element x ; $\langle H_1, \dots, H_k \rangle \subset \Gamma$ is the subgroup generated by subgroups H_1, \dots, H_k , $\Gamma(\beta_1, \dots, \beta_k)$ is the subgroup of Γ generated by the root subgroups $\mathcal{X}_{\pm\beta_1}, \dots, \mathcal{X}_{\pm\beta_k}$. Set $\Gamma(i_1, \dots, i_k) = \Gamma(\alpha_{i_1}, \dots, \alpha_{i_k})$ and $\Gamma(\beta, i_1, \dots, i_k) = \Gamma(\beta, \alpha_{i_1}, \dots, \alpha_{i_k})$. If $\beta = \sum_{i=1}^r b_i \alpha_i \in R^+(\Gamma)$ with $b_i \in \mathbb{Z}^+$, set $h(\beta) = \sum_{i=1}^r b_i$. We use the notation $\Gamma_{\mathbb{C}}$, ω , and $\omega(\varphi)$ in the same manner as for G .

Throughout the text $\dim V$ is the dimension of a subspace V . If $\lambda \in \Lambda^+(\Gamma)$, then $M(\lambda)$ and $V(\lambda)$ are the irreducible module and the Weyl module of Γ with highest weight λ ; $\omega(m)$ is the weight of a weight vector m from some module. If H is a subgroup of Γ , then $M|H$ is the restriction of a Γ -module M to H . We assume that the weights and the roots of Γ are considered with respect to a fixed maximal torus T . If $T \cap H$ is a maximal torus in H , then $\omega|H$ is the restriction of a weight ω to $T \cap H$. In this case for a weight vector m from some Γ -module, we set $\omega_H(m) = \omega(m)|H$. If M is an irreducible Γ -module, then $v \in M$ is a nonzero highest weight vector. For $\Gamma = A_1(K)$, the set $\Lambda(\Gamma)$ is canonically identified with \mathbb{Z} : $a\omega_1 \rightarrow a$.

The following facts are used intensively in the proofs of the main results.

Proposition 1 [2, a part of Proposition 2.5]. *Let M be a Γ -module, $x \in \Gamma$ be a unipotent element, and $|x| = p^{s+1} > p$.*

(a) *Assume that $l \leq s$ and $z = x^{p^l}$. Then $p^l(d_M(z) - 1) < d_M(z) \leq p^l d_M(z)$.*

(b) *Let $y = x^{p^s}$, $d_M(y) = a + 1$, $M_y = (y - 1)^a M$, and $d_{M_y}(x) = b$. Then $b \leq p^s$, $d_M(x) = ap^s + b$, and $\dim(x - 1)^{ap+b-1} M = \dim(x - 1)^{b-1} M_y$.*

Lemma 1 [1, Lemma 2.20]. *Let Γ be a semisimple algebraic group, $x, y \in \Gamma$ be unipotent, and $y \in \overline{cl(x)}$. Then $d_{\varphi}(y) \leq d_{\varphi}(x)$ for each representation φ of Γ .*

Lemma 2 [2, Lemma 2.42]. *Let $I \subset \Pi(\Gamma)$ be a proper subset and M be a Γ -module. Denote by Σ_I the set of integer linear combinations of the simple roots from I . Set $R_I = R^+(\Gamma) \cap \Sigma_I$ and $R' = R^+(\Gamma) \setminus R_I$. Let $m = m_1 + \dots + m_k \in M$ and m_j , $1 \leq j \leq k$, be the weight components of m .*

If $k > 1$, assume that $\omega(m_i) - \omega(m_j) \in \Sigma_i$ for $1 \leq i < j \leq k$. Suppose that $x' \in \langle \mathcal{X}_\alpha \mid \alpha \in R' \rangle$, $x_l \in \langle \mathcal{X}_\alpha \mid \alpha \in R_l \rangle$, $x = x'x_l$, and $(x_l - 1)^a m \neq 0$. Then $(x - 1)^a m \neq 0$. In particular, $d_N(x) \geq a + 1$ for any x -invariant subspace $N \subset M$ that contains m .

L e m m a 3. [3, Lemma 7] *Let M be a Γ -module, N be a composition factor of M , and $x \in \Gamma$ be a unipotent element. Then $d_M(x) \geq d_N(x)$.*

L e m m a 4. *Let $x \in U^+$ and $k = p^l$. Then $x^k \in \langle \mathcal{X}_\alpha \mid h(\alpha) \geq k \rangle$.*

To prove Lemma 4, it suffices to recall that for a weight vector m from an arbitrary Γ -module the vector $(x - 1)m = \sum m_i$ where m_i are weight vectors with $\omega(m_i) > \omega(m)$, and $(x - 1)^k m = (x^k - 1)m$.

L e m m a 5. *Let $\Gamma = A_1(K)$, $z = x_1(t) \in \Gamma$, $t \neq 0$, and N be an indecomposable Γ -module with highest weight $ap + p - 1$ generated by a highest weight vector v . Then $v \in (z - 1)^{p-1} N$.*

In the following lemma the symbol F_p denotes the field of p elements.

L e m m a 6 [2, Lemma 2.38]. *Let $\beta_1, \dots, \beta_k \in \Lambda^+(\Gamma)$, $t_1, \dots, t_k \in \mathbb{Z}$, and t_j be the image of t under the natural homomorphism $\mathbb{Z} \rightarrow F_p$. Let $x = \prod_{j=1}^k x_{\beta_j}(t_j) \in \Gamma$, $x_C = \prod_{j=1}^k x_{\beta_j}(t_j) \in \Gamma_C$, and φ be an irreducible representation of Γ . Then $d_\varphi(x) \leq d_{\varphi_C}(x_C)$.*

T h e o r e m 5 [2, Theorem 1.1]. *For a p -large representation ρ of a simple algebraic group Γ of a classical type over K and a unipotent element $x \in \Gamma$, the degree of the minimal polynomial of $\rho(x)$ is equal to the order of x .*

P r o p o s i t i o n 2 [3, a part of Proposition 5]. *Let $H \subset G$ be a subsystem subgroup of type C_3 or B_4 and φ be a p -large irreducible representation of G . Then the restriction $\varphi \mid H$ has a p -large composition factor.*

On the proofs of the main results. The size of this article does not permit us to include the proofs even for the main results, so we present the schemes of these proofs. It is clear that $d_\varphi(u) \leq |u|$ for all unipotent elements u and representations φ . Set $l = 9$ if $p = 3$ and u is a regular unipotent element, and $l = p$ otherwise. Put $d'_\varphi(u) = \min\{|u|, d_{\varphi_C}(u_C), ld_\varphi(u^l)\}$. Then Proposition 1 and Lemma 6 imply that $d_\varphi(u) \leq d'_\varphi(u)$. Hence we are done if we can show that $d_\varphi(u) \geq d'_\varphi(u)$. The latter inequality holds in the majority of cases, but there are some exceptions for $p = 3$ (see Theorem 2). The proofs of Theorem 1 and Theorem 3 for elements of a subsystem subgroup of type B_4 are based on quite close arguments. We analyze the restrictions of the representations being considered to proper subsystem subgroups and apply the results on the minimal polynomials of the images of unipotent elements in irreducible representations of the classical groups [2, Theorems 1.7 and 1.10] and on such polynomials for elements of order p [1, Theorem 1.1, Proposition 1.3, Algorithm 1.4, and Table 4], Theorem 5, Proposition 2, and Lemmas 3 and 1.

One easily observes that $G(\alpha_2 + 2\alpha_3 + 2\alpha_4, 1, 2, 3) \cong B_4(K)$. We use this group when analyzing the restrictions of representations to a subsystem subgroup of type B_4 .

Now assume that $x \in G$ is a regular unipotent element. Set $y = x^9$ for $p = 3$ and $y = x^7$ for $p = 7$. Define M_y such as in Proposition 1. Assume that φ is p -restricted. First suppose that $p = 3$. Now we state two lemmas that play an important role in the proof of Theorem 2. Let α be the maximal root of G . It is well known that $\alpha = 2\alpha_1 + 3\alpha_2 + 4\alpha_3 + 2\alpha_4$.

L e m m a 7. *Let $x \in U^+$. Then $y \in \mathcal{X}_\alpha$.*

On the proof of Lemma 7. Set $R_9 = \{\alpha_1 + 2\alpha_2 + 4\alpha_3 + 2\alpha_4, \alpha_1 + 3\alpha_2 + 4\alpha_3 + 2\alpha_4, \alpha\}$. One easily concludes that R_9 is the set of roots β of G with $h(\beta) \geq 9$. By Lemma 4, $y \in \langle \mathcal{X}_\beta \mid \beta \in R_9 \rangle$. Using conjugation by elements of U^+ , one can assume that $y = x_\delta(t)$ where $\delta \in R_9$. Analyzing the action of the elements x and y on the irreducible module N with highest weight ω_4 , we deduce that $\delta = \alpha$, otherwise we would get that $d_N(x) > 15$ and obtain a contradiction due to [6, Table 3].

L e m m a 8. *Let $\Gamma = C_3(K)$, $u \in \Gamma$ be a regular unipotent element, and ρ be an irreducible representation of Γ . Assume that $d_\rho(u) < 9$. Then $\omega(\rho) \in \{0, 3^j\omega_1, 3^j\omega_3\}$ ($j \in \mathbb{Z}^+$).*

The proof of Lemma 8 follows from [2, Table VII] and [8, Lemma 6.14 and Theorem 6.4].

One easily observes that the group $H = G(2, 3, 4) \subset C_G(y)$ and that $H \cong C_3(K)$. Put $I = \{\alpha_2, \alpha_3, \alpha_4\}$, $x' = x_1(1)$, and $x_l = x_2(1)x_3(1)x_4(1)$. Take $x = x'x_l$. Applying Lemmas 8 and 3, we can conclude that $d_{M_y}(x_l) = 9$ if φ is p -restricted and $\omega(\varphi) \notin \{\omega_1, \omega_4\}$. Now Theorem 2 follows from Lemma 2, Proposition 1, [6, Tables 3 and 4], and Formula (1).

Now let $p = 7$. Lemma 1 implies that for proving Theorem 3 for the element x , it suffices to consider only irreducible representations φ with $d_\varphi(z) < 49$ for a regular unipotent element z of a subsystem subgroup of type B_4 , in particular, Proposition 2 and Theorem 5 allow us to exclude p -large representations.

Now we state three results that are used for computing the minimal polynomial of $\varphi(x)$ in the remaining cases.

Proposition 3. Put $R_0 = R^+(G) \setminus \{\alpha_1, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_3 + \alpha_4\}$, $\beta = \alpha_1 + 2\alpha_2 + 2\alpha_3 + 2\alpha_4$, and $\gamma = \alpha_1 + 2\alpha_2 + 3\alpha_3 + \alpha_4$. One can assume that $x = x_0 x_1(t_1)u$, where $x_0 \in \langle \mathcal{X}_\alpha \mid \alpha \in R_0 \rangle$, $u = x_3(t_3)x_4(t_4)x_{\alpha_3 + \alpha_4}(t)$, $y = x_\beta(t_\beta)x_\gamma(t_\gamma)$, and $t_1 t_3 t_4 t_\beta t_\gamma \neq 0$.

On the proof of Proposition 3. Taking into account the commutation relations in G , one easily observes that a regular unipotent element lying in U^+ can be represented in such form as in the assertion of the proposition. By [6, Table D], y is a product of commuting nontrivial long and short root elements. Set

$$R_7 = \{\beta, \gamma, \alpha_1 + 2\alpha_2 + 3\alpha_3 + 2\alpha_4, \alpha_1 + 2\alpha_2 + 4\alpha_3 + 2\alpha_4, \alpha_1 + 3\alpha_2 + 4\alpha_3 + 2\alpha_4, 2\alpha_1 + 3\alpha_2 + 4\alpha_3 + 2\alpha_4\}.$$

One easily checks that R_7 coincides with the set of roots δ with $h(\delta) \geq 7$. By Lemma 4, $y \in \langle \mathcal{X}_\delta \mid \delta \in R_7 \rangle$ if $x \in U^+$. Taking these facts into account and applying the conjugation in U^+ , we obtain the required equality for y .

Lemma 9. The group $C_G(y)$ contains a subgroup $A \cong A_1(K)$ such that $u \in A \subset G(3, 4)$ and A contains a nontrivial element from $\langle \mathcal{X}_{-3}, \mathcal{X}_{-4} \rangle$; $G(1) \subset C_G(y)$.

Lemma 10. Let $\Gamma = A_2(K)$, $g \in U^+(\Gamma)$ be a regular unipotent element, N be an irreducible p -restricted Γ -module with highest weight $\omega = a_1\omega_1 + a_2\omega_2$, and $w \in N$ be a nonzero lowest weight vector. Assume that the Weyl module $V(\omega)$ is irreducible. Put $l = \min\{2(a_1 + a_2), 6\}$. Then the vector $(z - 1)^l w$ has a nontrivial weight component of weight $\omega(w) + b_1\alpha_1 + b_2\alpha_2$ with $b_1 + b_2 = l$.

To prove Theorem 3 for x , we show that in all cases under consideration $d_{M_y}(x_1(t_1)u) \geq d'_\varphi(x) - 7(d_M(y) - 1)$ and then apply Lemma 2 and Proposition 1. To estimate the parameter $d_{M_y}(x_1(t_1)u)$, we have to deal not only with composition factors of the restriction $M|G(1)A$, but with sections (quotient modules of submodules) of this restriction as well. Here Lemma 10 is used.

Conclusion. Theorems 1 and 2 can be used for computing the minimal polynomials of the images of unipotent elements in irreducible representations of the group $E_6(K)$ for $p = 3$. This would complete the solution of the minimal polynomial problem for the latter group in an odd characteristic.

Acknowledgements. This research has been supported by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (Project No Ф20MC-036)

Благодарности. Работа поддержана БРФФИ (проект № Ф20MC-036).

References

- Suprunenko I. D. Minimal polynomials of elements of order p in irreducible representations of Chevalley groups over fields of characteristic p . *Siberian Advances in Mathematics*, 1996, vol. 6, pp. 97–150.
- Suprunenko I. D. The minimal polynomials of unipotent elements in irreducible representations of the classical groups in odd characteristic. *Memoirs of the AMS*, 2009, vol. 200, no. 939. <https://doi.org/10.1090/memo/0939>
- Busel T. S., Suprunenko I. D., Testerman D. Minimal polynomials of unipotent elements of non-prime order in irreducible representations of the exceptional algebraic groups in some good characteristics. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2019, vol. 63, no. 5, pp. 519–525. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-5-519-525>
- Hall P., Higman G. On the p -length of p -soluble groups and reduction theorem for Burnside's problem. *Proceedings of the London Mathematical Society*, 1956, vol. s3-6, no. 1, pp. 1–42. <https://doi.org/10.1112/plms/s3-6.1.1>
- Steinberg R. *Lectures on Chevalley groups. Mimeographed lecture notes*. Yale Univ. Math. Dept., New Haven, Conn., 1968.
- Lawther R. Jordan block sizes of unipotent elements in exceptional algebraic groups. *Communication in Algebra*, 1995, vol. 23, no. 11, pp. 4125–4156. <https://doi.org/10.1080/00927879508825454>
- Steinberg R. Representations of algebraic groups. *Nagoya Mathematical Journal*, 1963, vol. 22, pp. 33–56. <https://doi.org/10.1017/s002776300011016>
- Gudivok P. M., Rudko V. P. *Tensor products of representations of finite groups*. Uzhgorod, 1985 (in Russian).

Information about the author

Suprunenko Irina D. – D. Sc. (Physics and Mathematics), Chief Researcher. Institute of Mathematics of the National Academy of Sciences of Belarus (11, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: suprunenko@im.bas-net.by

Информация об авторе

Супруненко Ирина Дмитриевна – д-р физ.-мат. наук, гл. науч. сотрудник. Институт математики НАН Беларуси (ул. Сурганова, 11, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: suprunenko@im.bas-net.by

ИНФОРМАТИКА**INFORMATICS**

УДК 533.72+519.218.28

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-3-274-279>

Поступило в редакцию 30.04.2021

Received 30.04.2021

Член-корреспондент П. С. Гринчук, С. П. Фисенко, А. И. Шнип*Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь***МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВАКЦИНАЦИИ
НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЭПИДЕМИИ COVID-19**

Аннотация. Предложена математическая модель на основе системы обыкновенных дифференциальных уравнений для описания влияния темпа вакцинации на распространение эпидемии типа COVID-19. Приведены результаты численного моделирования для случая, когда вакцинация начинается после начала распространения эпидемии. Получен безразмерный параметр вакцинации V , который позволяет количественно характеризовать влияние темпа вакцинации на снижение заболеваемости вирусными заболеваниями с различными уровнями вирулентности в большой замкнутой популяции людей. Введение этого параметра позволяет переносить результаты моделирования на популяции других размеров для разных скоростей распространения эпидемии, разных скоростей вакцинирования и разной эффективности вакцин. Показано, что увеличение параметра вакцинации V при прочих равных условиях приводит к снижению доли заболевшего населения. Показано также, что при постоянном темпе вакцинации ее влияние на распространение респираторного вирусного заболевания типа COVID-19 снижается при более позднем начале вакцинации. Результаты моделирования могут способствовать разработке оптимальных сценариев вакцинации населения.

Ключевые слова: коронавирус, COVID-19, вакцинация, математическое моделирование, численность популяции, коэффициент распространения

Для цитирования. Гринчук, П. С. Математическое моделирование влияния вакцинации на распространение эпидемии COVID-19 / П. С. Гринчук, С. П. Фисенко, А. И. Шнип // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2022. – Т. 66, № 3. – С. 274–279. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-3-274-279>

Corresponding Member Pavel S. Grinchuk, Sergey P. Fisenko, Alexander I. Shnip*A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus***MATHEMATICAL MODELING OF THE VACCINATION INFLUENCE
ON THE COVID-19 EPIDEMIC PROPAGATION**

Abstract. The mathematical model based on a system of ordinary differential equations is proposed to describe the effect of the vaccination rate on the spread of the COVID-19 epidemic. The results of numerical modeling are presented for the case when vaccination begins after the beginning of the epidemic. A dimensionless vaccination parameter V was obtained, which allows one to characterize the effect of the vaccination rate on the reduction of the incidence of viral diseases with different virulence levels in a large closed population of people. Introducing this parameter allows the simulation results to be generalized to the populations of different size, different epidemic spread rate, different vaccination rate, and different vaccine efficiency. It has been shown that increasing the parameter V decreases the proportion of the sick population. It follows from our model that the vaccination influence on the spread of a respiratory viral disease such as COVID-19 decreases for a later initiation of vaccination. The simulation results should contribute to the development of optimal vaccination scenarios for the population.

Keywords: coronavirus, COVID-19, vaccination, mathematical modeling, population size, distribution coefficient

For citation. Grinchuk P. S., Fisenko S. P., Shnip A. I. Mathematical modeling of the vaccination influence on the COVID-19 epidemic propagation. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2022, vol. 66, no. 3, pp. 274–279 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-3-274-279>

Введение. Новая пандемия стала как новым глобальным вызовом, требующим новых подходов для эффективного противодействия, так и открыла новые возможности для понимания процессов взаимодействия людей в больших сообществах. Благодаря тому, что оперативная статистическая информация о распространении COVID-19 является общедоступной, к проблеме активно подключились ученые, причем не только медики и биологи, но в том числе физики и математики. Например, в [1–3] были рассмотрены различные демографические, географические и физические аспекты, влияющие на распространение эпидемии COVID-19. Еще на начальной стадии развития эпидемии итальянскими учеными была обнаружена общая функциональная зависимость (pattern) в динамике распространения коронавируса для Китая, Франции и Италии [4]:

$$C(n+1) = \alpha[C(n)]^\beta.$$

Здесь C – количество заболевших в день n после начала эпидемии (в день начала эпидемии заболевает $C(0)$ человек); α , β – константы, находящиеся в узком диапазоне значений для разных стран и сообществ ($\alpha \approx 1,5$ – $2,5$, $\beta \approx 0,9$ – $0,95$). Авторы данной работы показали, что эта функциональная зависимость со своими значениями коэффициентов α и β применима к описанию начальной стадии развития эпидемии коронавируса и в Республике Беларусь. Более того, авторы впервые предложили гипотезу о том, что корректное описание динамики распространения респираторной эпидемии в больших странах возможно при рассмотрении нескольких независимых волн эпидемии, одновременно распространяющихся в субпопуляциях с существенно разной плотностью населения [5]. Приближение трех одновременных волн для Республики Беларусь позволило построить беспрецедентный по точности прогноз на все лето 2020 года [5; 6]. Интересно отметить, что к аналогичной модели одновременных множественных волн пришла и другая исследовательская группа из Гарвардского университета (США) [7]. Эта работа была опубликована на один день позже препринта белорусской группы. Важно отметить и развитие другими отечественными группами альтернативных подходов для прогнозирования распространения эпидемии, основанных на методах математической статистики [8].

Характерной особенностью второго года развития эпидемии стало создание нескольких вакцин (Sputnik V и др.) и начало относительно массовой вакцинации населения. На вакцинацию возлагаются большие надежды с точки зрения остановки распространения вируса в отдельных странах. Через 2–3 месяца с начала вакцинации уже можно делать определенные выводы. Например, в ряде стран с началом вакцинации уровень заболеваемости COVID-19 стал падать (Великобритания, Израиль, ОАЭ). В других странах, несмотря на вакцинацию, заболеваемость COVID-19 продолжала расти (Франция, Германия, Италия) [9]. Мы полагаем, что скорость или темп вакцинации в данном случае играет существенную роль. В рамках данной работы мы изучаем модель, описывающую влияние темпа вакцинации на динамику развития заболеваемости коронавирусом в отдельной популяции. Важно отметить, что рассматривается вариант, когда вакцинация стартует уже после начала эпидемии, что отличает пандемию COVID-19. В этой работе представлены результаты численного моделирования влияния вакцинирования на распространение эпидемии.

Математическая модель. Основой математической модели является логистическое уравнение, широко применяемое для описания распространения эпидемий. На этом уравнении базируется ряд эпидемиологических моделей математической биологии, таких как SIR (Susceptible-Infectious-Recovered), SIRD (Susceptible-Infectious-Recovered-Dead) и др. Важно, что подобные модели, использовавшиеся ранее, не учитывают такой фактор, как вакцинация. Недавние попытки включения процесса вакцинации в модели распространения эпидемий [10; 11] носят все еще достаточно абстрактный характер. Новые модели включают в себя до 12 уравнений с большим количеством (до 30) эмпирических коэффициентов [11], что не позволяет существенно продвигаться в теоретическом анализе эпидемической ситуации.

С учетом вакцинации наша нелинейная математическая модель состоит из двух обыкновенных дифференциальных уравнений и включает в себя общепринятые в эпидемиологии параметры. Уравнение для числа заболевших людей y имеет вид

$$\frac{dy}{dt} = R_0 y \left(1 - \frac{y + N_v(t)}{N} \right). \quad (1)$$

Уравнение для числа вакцинированных людей также имеет простую форму

$$\frac{dN_v}{dt} = ca. \quad (2)$$

Здесь R_0 – коэффициент распространения эпидемии; N – численность популяции; $N_v(t)$ – число вакцинированных людей, не участвующих в передаче инфекции; c – эффективность вакцины ($c < 1$); a – число людей, получающих вакцину в сутки. В этой работе будем для простоты считать a постоянной во времени величиной. В практике массового вакцинирования a может меняться во времени.

В [1] было показано, характерное время распространения эпидемии τ

$$\tau = 1 / R_0,$$

и длительность эпидемии (без учета вакцинации) t_f приближенно выражается формулой

$$t_f \approx \ln N / R_0.$$

Из рассмотрения системы уравнений (1), (2) следует, что в задаче появляется еще одно характерное время τ_v

$$\tau_v = N / ac.$$

Параметр τ_v – это характерное время вакцинации популяции.

Сделаем численную оценку τ_v для популяции $N = 2 \cdot 10^6$ человек. Если $R_0 = 0,5$, то $\tau = 2$ дня и $t_f \approx 29$ дней. При эффективности вакцины $c = 0,8$ и скорости вакцинирования $a = 10^4$ чел/день, имеем, что $\tau_v = 25$ дней.

Из (1), (2) следует, что скорость распространения эпидемии достигает максимума при условии

$$y = 0,5(N - N_v(t)).$$

Это условие является обобщением результата в [1] и выполняется при любом значении R_0 . Эпидемия заканчивается, если выполняется второе условие

$$y(t_f) + N_v(t_f) = N.$$

Для описания вакцинации во время эпидемии возникает естественный безразмерный параметр V , который можно назвать параметром вакцинации:

$$V = t_f / \tau_v \approx \frac{ac}{R_0} \frac{\ln N}{N}. \quad (3)$$

Если $V = 0$, то вакцинирование в популяции не проводится. Чем больше величина параметра V , тем большее влияние оказывает вакцинирование на распространение эпидемии. Обратим внимание, что безразмерный параметр V прямо пропорционален эффективности вакцины.

Результаты расчетов. Ниже приведены численные результаты моделирования системы уравнений (1), (2). Обратим внимание, что в наших расчетах предполагается, что вакцинирование началось на второй день эпидемии. Для численного решения задачи Коши для системы дифференциальных уравнений использовался пакет Mathcad 15.

На рис. 1 показано влияние вакцинации на распространение эпидемии. Заметим, что для выбранного размера популяции при скорости вакцинирования 10 000 или менее человек в день длительность эпидемии практически не изменилась по сравнению со временем распространения эпидемии в популяции при отсутствии вакцинации. Высокая скорость вакцинации существенно снижает число заболевших людей, снижает нагрузку на систему здравоохранения, и тем самым способствует снижению уровня смертности в популяции. Из результатов моделирования следует,

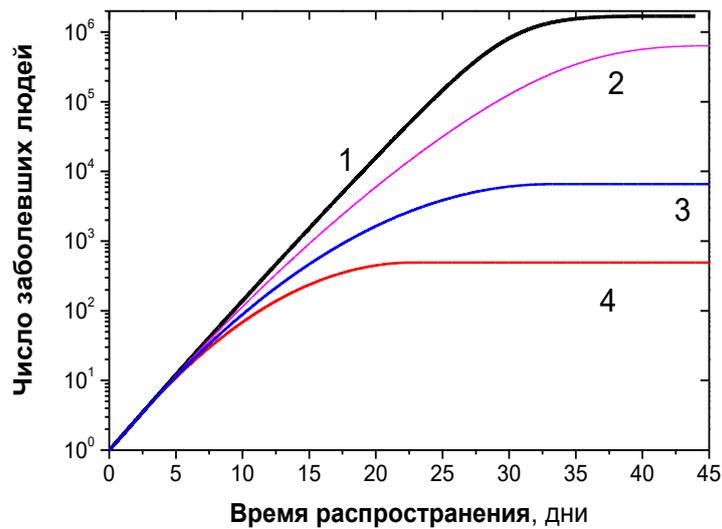


Рис. 1. Число заболевших людей в популяции 2 млн чел. при разной скорости вакцинации: 1 – скорость вакцинации 10 тыс. чел/день; 2 – 40 тыс. чел/день; 3 – 80 тыс. чел/день; 4 – 120 тыс. чел/день

Fig. 1. The number of sick people in a population of 2,000,000 people at different rates of vaccination: 1 – vaccination rate of 10,000 ppl/day; 2 – 40,000 ppl/day; 3 – 80,000 ppl/day; 4 – 120,000 ppl/day

что изменение темпа вакцинации приводит к монотонному изменению отклика всей популяции на количество инфицированных. При этом пороговых переходов не наблюдается ни при каких сочетаниях параметров.

На рис. 2 показана рассчитанная по модели (1), (2) доля заболевшего населения в зависимости от величины параметра V . Обратим внимание, что параметр V зависит не только от скорости вакцинации, но и от значения R_0 . Таким образом, поддержание более низкого значения R_0 за счет использования масок, соблюдения респираторного этикета и мер социального дистанцирования увеличивает значение V и снижает долю заболевших людей даже во время вакцинации.

Численные результаты о доле заболевших людей получены для $N = 2 \cdot 10^6$ человек. Для другой популяции достижение такого же значения безразмерного параметра V при прочих равных условиях требует другой скорости вакцинации. Как следует из нашей модели, при постоянном

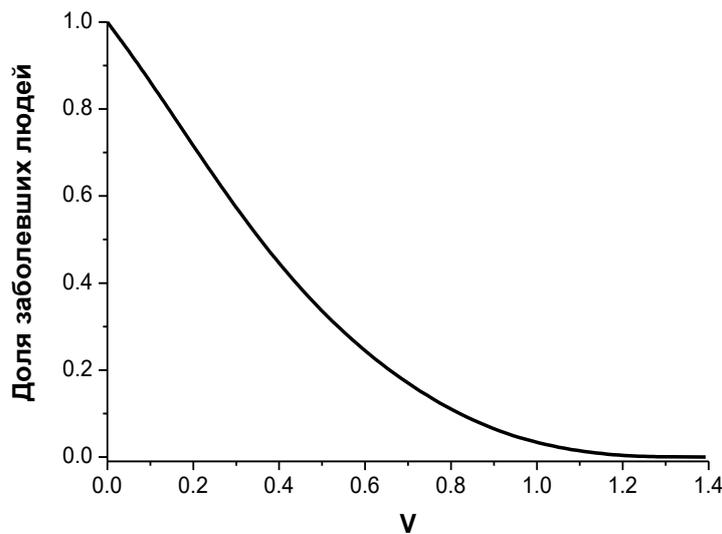


Рис. 2. Зависимость расчетной доли заболевшего населения от величины параметра вакцинации V (уравнение (3))

Fig. 2. Dependence of the estimated proportion of the diseased population on the value of the vaccination parameter V (eq. (3))

значении параметра вакцинации V соответствующая ему скорость вакцинации a нелинейно зависит от размера популяции $a \sim N / \ln(N)$.

Закключение. Построена математическая модель для описания влияния темпа вакцинации на распространение эпидемии типа COVID-19 в достаточно большой замкнутой популяции людей. Модель представляет собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений, начальные условия для которых ставятся в разные моменты времени. Приведены результаты численного моделирования для случая, когда вакцинация начинается на второй день распространения эпидемии. Показано, что при постоянном темпе вакцинации ее влияние на распространение респираторного вирусного заболевания типа COVID-19 снижается при более позднем начале вакцинации.

Получен безразмерный параметр вакцинации V , который позволяет количественно характеризовать влияние темпа вакцинации конкретной вакциной (эффективность вакцины c) на снижение заболеваемости вирусными заболеваниями с различными уровнями вирулентности (коэффициент распространения R_0) в популяции заданного размера N . Введение этого параметра позволяет переносить результаты моделирования на популяции других размеров, разных скоростей распространения эпидемии, разных скоростей вакцинирования и разной эффективности вакцин. Показано, что уровень заболеваемости имеет обратную корреляцию с параметром вакцинации V – повышение этого параметра при прочих равных условиях приводит к снижению доли заболевшего населения.

Представляется важным обобщить модель на более сложные случаи, используя приближение трех групп населения, развитое в [1; 5].

Благодарности. Авторы признательны за поддержку БРФФИ (грант Т21КОВИД-033).

Acknowledgements. The authors are much grateful for the support of the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (Grant T21КОВИД-033).

Список использованных источников

1. Grinchuk, P. S. Physical Kinetics and Simulation of the Spread of an Epidemic / P. S. Grinchuk, S. P. Fisenko // *J. Eng. Phys. Thermophys.* – 2021. – Vol. 94, N 1. – P. 1–5. <https://doi.org/10.1007/s10891-021-02267-z>
2. Shnip, A. I. Epidemic Dynamics Kinetic Model and Its Testing on the Covid-19 Epidemic Spread Data / A. I. Shnip // *J. Eng. Phys. Thermophys.* – 2021. – Vol. 94, N 1. – P. 6–17. <https://doi.org/10.1007/s10891-021-02268-y>
3. Isothermal Evaporation Rate of Deposited Liquid Aerosols and the SARS-CoV-2 Coronavirus Survival / P. S. Grinchuk [et al.] // *Aerosol Air Qual. Res.* – 2021. – Vol. 21, N 3. – Art. 200428. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2020.07.0428>
4. Fanelli, D. Analysis and forecast of COVID-19 spreading in China, Italy and France / D. Fanelli, F. Piazza // *Chaos Soliton Fract.* – 2020. – Vol. 134. – Art. 109761. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2020.109761>
5. Гринчук, П. С. Несколько одновременных волн в распространении COVID-19. Объяснение длительного плато [препринт] / П. С. Гринчук, С. П. Фисенко // *Preprints.ru.* – 2020. – 1 июня. <https://doi.org/10.24108/preprints-3112063>
6. Grinchuk, P. S. Power-law multi-wave model for COVID-19 propagation in countries with nonuniform population density [preprint] / P. S. Grinchuk, S. P. Fisenko // *arXiv.* – 2020. – 14 December. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2012.06383>
7. Kaxiras, E. Multiple epidemic wave model of the covid-19 pandemic: Modeling study / E. Kaxiras, G. Neofotistos // *Journal of Medical Internet Research.* – 2020. – Vol. 22, N 7. – Art. e20912. <https://doi.org/10.2196/20912>
8. Статистическое прогнозирование динамики эпидемиологических показателей заболеваемости COVID-19 в Республике Беларусь / Ю. С. Харин [и др.] // *Журн. Белорус. гос. ун-та. Математика. Информатика.* – 2020. – № 3. – С. 36–50. <https://doi.org/10.33581/2520-6508-2020-3-36-50>
9. WHO Coronavirus (COVID-19) Dashboard [Electronic resource]. – Mode of access: <https://covid19.who.int/>. – Date of access: 02.04.2021.
10. Ehrhardt, M. SIR-based mathematical modeling of infectious diseases with vaccination and waning immunity / M. Ehrhardt, J. Gašper, S. Kilianová // *Journal of Computational Science.* – 2019. – Vol. 37. – Art. 101027. <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2019.101027>
11. Martínez-Rodríguez, D. Analysis of key factors of a SARS-CoV-2 vaccination program: A mathematical modeling approach / D. Martínez-Rodríguez, G. Gonzalez-Parra, R. J. Villanueva // *Epidemiologia.* – 2021. – Vol. 2, N 2. – P. 140–161. <https://doi.org/10.3390/epidemiologia2020012>

References

1. Grinchuk P. S., Fisenko S. P. Physical Kinetics and Simulation of the Spread of an Epidemic. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2021, vol. 94, no. 1, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1007/s10891-021-02267-z>
2. Shnip A. I. Epidemic Dynamics Kinetic Model and its Testing on the Covid-19 Epidemic Spread Data. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2021, vol. 94, no. 1, pp. 6–17. <https://doi.org/10.1007/s10891-021-02268-y>

3. Grinchuk P. S., Fisenko K. I., Fisenko S. P., Danilova-Tretiak S. M. Isothermal Evaporation Rate of Deposited Liquid Aerosols and the SARS-CoV-2 Coronavirus Survival. *Aerosol and Air Quality Research*, 2021, vol. 21, no. 3, art. 200428. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2020.07.0428>
4. Fanelli D., Piazza F. Analysis and forecast of COVID-19 spreading in China, Italy and France. *Chaos, Solitons and Fractals*, 2020, vol. 134, art. 109761. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2020.109761>
5. Grinchuk P. S., Fisenko S. P. Several simultaneous waves of COVID-19. Explanation of long-time plateau [preprint]. *Preprints.ru*, 2020, 01 June (in Russian). <https://doi.org/10.24108/preprints-3112063>
6. Grinchuk P. S., Fisenko S. P. Power-law multi-wave model for COVID-19 propagation in countries with nonuniform population density [preprint]. *arXiv:2012.06383*, 2020, 14 December. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2012.06383>
7. Kaxiras E., Neofotistos G. Multiple epidemic wave model of the COVID-19 pandemic: Modeling study. *Journal of Medical Internet Research*, 2020, vol. 22, no. 7, art. e20912. <https://doi.org/10.2196/20912>
8. Kharin Yu. S., Valoshka V. A., Dernakova O. V., Malugin V. I., Kharin A. Yu. Statistical forecasting of the dynamics of epidemiological indicators for COVID-19 incidence in the Republic of Belarus. *Journal of the Belarusian State University. Mathematics and Informatics*, 2020, no. 3, pp. 36–50 (in Russian). <https://doi.org/10.33581/2520-6508-2020-3-36-50>
9. WHO Coronavirus (COVID-19) Dashboard. Available at: <https://covid19.who.int/> (accessed 02.04.2020).
10. Ehrhardt M., Gašper J., Kiliánová S. SIR-based mathematical modeling of infectious diseases with vaccination and waning immunity. *Journal of Computational Science*, 2019, vol. 37, art. 101027. <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2019.101027>
11. Martínez-Rodríguez D., Gonzalez-Parra G., Villanueva R. J. Analysis of key factors of a SARS-CoV-2 vaccination program: A mathematical modeling approach. *Epidemiologia*, 2021, vol. 2, no. 2, pp. 140–161. <https://doi.org/10.3390/epidemiologia2020012>

Информация об авторах

Гринчук Павел Семенович – член-корреспондент, д-р физ.-мат. наук, заведующий отделом. Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: gps@hmti.ac.by.

Фисенко Сергей Павлович – д-р физ.-мат. наук, гл. науч. сотрудник. Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: fsp@hmti.ac.by.

Шнип Александр Иванович – канд. физ.-мат. наук, заведующий лабораторией. Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: shnip@hmti.ac.by.

Information about the authors

Grinchuk Pavel S. – Corresponding Member, D. Sc. (Physics and Mathematics), Head of the Department. A. V. Lykov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: gps@hmti.ac.by.

Fisenko Sergei P. – D. Sc. (Physics and Mathematics), Chief Researcher. A. V. Lykov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: fsp@hmti.ac.by.

Shnip Alexander I. – Ph. D. (Physics and Mathematics), Head of the Laboratory. A. V. Lykov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: shnip@hmti.ac.by.

ФИЗИКА**PHYSICS**

УДК 621.384.3

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-3-280-286>

Поступило в редакцию 05.04.2022

Received 05.04.2022

В. М. Кравченко, А. И. Конойко, А. С. Кузьмицкая, В. В. Малютина-Бронская*Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника, Минск, Республика Беларусь***ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ МИКРОРЕЗОНАТОРОВ ФАБРИ–ПЕРО
ДЛЯ ТЕПЛОВИЗИОННОЙ ТЕХНИКИ***(Представлено академиком Н. С. Казаком)*

Аннотация. Представлены результаты исследований разработанной ИК-системы на базе микрорезонатора Фабри–Перо, функционирующей на основе термооптического эффекта, для ее возможного применения в тепловизионной технике. Рассчитанный по экспериментальным данным коэффициент перестройки микрорезонатора Фабри–Перо составил $k_p = 0,44$ нм/°С. Изготовлена матрица микрорезонаторов Фабри–Перо с резонаторами-пикселями в виде квадратов 8×8 мкм² с зазором 2 мкм в количестве 640×480 штук. Показано, что характеристики разработанной системы термовизуализации не уступают тепловизионным системам сопоставимого класса.

Ключевые слова: микрорезонатор Фабри–Перо, термооптический преобразователь, тепловизионная техника

Для цитирования. Перспективы применения микрорезонаторов Фабри–Перо для тепловизионной техники / В. М. Кравченко [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2022. – Т. 66, № 3. – С. 280–286. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-3-280-286>

Vladimir M. Kravchenko, Alexei I. Konoiko, Anna S. Kuzmickaya, Victoriya V. Malyutina-Bronskaya*State Scientific and Production Association of Optics, Optoelectronics and Laser Technology,
Minsk, Republic of Belarus***PROSPECTS FOR THE APPLICATION OF FABRY–PEROT MICRORESONATORS
FOR THERMAL IMAGING EQUIPMENT***(Communicated by Academician Nikolay S. Kazak)*

Abstract. The results of study of the developed IR system based on the Fabry–Perot microresonator, functioning on the basis of the thermal-optical effect, are presented for its possible application in thermal imaging technology. The tuning factor of the Fabry–Perot microresonator calculated from the experimental data was $k_p = 0.44$ nm/°C. An array of Fabry–Perot microresonators with pixel resonators in the form of 8×8 μm² squares with a 2 μm gap in the amount of 640×480 pieces was made. It is shown that the characteristics of the developed thermal imaging system are not inferior to thermal imaging systems of a comparable class.

Keywords: Fabry–Perot microresonator, thermo-optical converter, thermal imaging equipment

For citation. Kravchenko V. M., Konoiko A. I., Kuzmickaya A. S., Malyutina-Bronskaya V. V. Prospects for the application of Fabry–Perot microresonators for thermal imaging equipment. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2022, vol. 66, no. 3, pp. 280–286 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-3-280-286>

Введение. В настоящее время активно развивается направление тепловизионной техники и инфракрасных систем (ИК-систем) в связи с их широким применением в различных областях науки и техники. В ряде случаев выделяют две группы ИК-систем. К одной из которых относят системы, предназначенные для визуализации инфракрасных изображений (тепловизионные системы), а к другой – системы, служащие для радиометрических измерений, т. е. для измерений

температуры объектов, их яркости и других параметров (радиометрические системы). Каждая из этих систем обладает своими техническими требованиями по пространственному и временному разрешению, отношению сигнал/шум, пороговой чувствительности и другим. Исходя из физического принципа работы приемника излучения, ИК-системы можно классифицировать как электронно-оптические преобразователи, к которым по ряду признаков относятся многоэлементные твердотельные приемники оптического излучения (тепловые и фотонные, охлаждаемые и неохлаждаемые, болометрические, фотодиодные, фоторезисторные и другие устройства) [1–3].

Именно приемник – преобразователь оптического сигнала во многом определяет возможности и критерии качества работы ИК-системы. Среди промышленно выпускаемых ИК-систем наибольшее распространение получили неохлаждаемые тепловые многоэлементные фотоприемники излучения на основе микроболометрических матриц (на базе аморфного кремния, оксида ванадия) форматов 320×240 , 640×480 и 1024×768 с размерами пикселей 12–17 мкм [4–9]. Одной из основных задач, стоящих в настоящее время перед разработчиками ИК-систем, является совершенствование элементной базы: создание новых фотоприемных устройств высокого пространственного разрешения; оптических систем, работающих в широком спектральном диапазоне; снижение масс-габаритных параметров и энергопотребления; уменьшение стоимости компонентов и систем в целом и другие. Уменьшение размера пикселя в два раза позволит уменьшить диаметр входного зрачка и фокусное расстояние объектива, а также до 8 раз уменьшить общий объем ИК-системы при сохранении прежнего разрешения. В связи с этим создание неохлаждаемого приемника ИК-излучения с меньшим размером пикселя и высоким разрешением является актуальной задачей мирового уровня. Одним из возможных решений поставленной задачи может быть разработка систем визуализации ИК-изображений, в которых применяется термооптический эффект, вместо преимущественно используемых в настоящее время в микроболометрах терморезистивного или пироэлектрического эффектов [4–6].

В настоящей работе представлены результаты разработки и исследований неохлаждаемой ИК-системы на базе микрорезонатора Фабри–Перо, функционирующего на основе термооптического эффекта, для его возможного применения в тепловизионной технике длинноволнового ИК-диапазона (от 8 до 14 мкм).

Материалы и методы исследования. В основе разработанной ИК-системы лежит матрица перестраиваемых теплоизолированных между собой микрорезонаторов Фабри–Перо (пикселей) на теплопроводной и прозрачной для оптического излучения подложке (рис. 1, а).

Рассмотрим принцип работы такой ИК-системы. Формируемое объективом изображение в длинноволновом ИК-диапазоне строится на матрице резонаторов-пикселей, из-за нагрева которых происходит сдвиг их пиковых длин волн. Поглощенная энергия падающего ИК-излучения приводит в конечном счете к изменению оптической базы микрорезонатора. Система считывания направляет на резонаторы-пиксели считывающее излучение с длиной волны, близкой к пиковым длинам волн спектральных характеристик резонаторов-пикселей. Коэффициент пропускания резонаторов-пикселей зависит от их температуры. Высокая чувствительность микрорезонаторов Фабри–Перо является следствием того, что принцип их работы базируется на физическом явлении многолучевой интерференции. Поэтому на фотоприемной матрице (ПЗС или КМОП), принимающей считывающее излучение, формируется изображение, соответствующее нагреву резонаторов-пикселей, т. е. входному изображению в длинноволновом ИК-диапазоне. Таким образом, светомодуляционные характеристики микрорезонатора определяются коэффициентом температурного преобразования, т. е. температурной зависимостью, базы резонатора.

Коэффициент перестройки такой системы тем выше, чем уже спектр считывающего излучения и чем круче фронты спектральных характеристик этого излучения и пропускания резонаторов-пикселей.

Матрица микрорезонаторов Фабри–Перо, предназначенная для преобразования информации из ИК области спектра в более коротковолновую (видимую), представляет собой совокупность микрорезонаторов, расположенных в одной плоскости.

Технология создания матрицы микрорезонаторов Фабри–Перо заключается в использовании известных технологических операций вакуумного электронно-лучевого напыления оптических

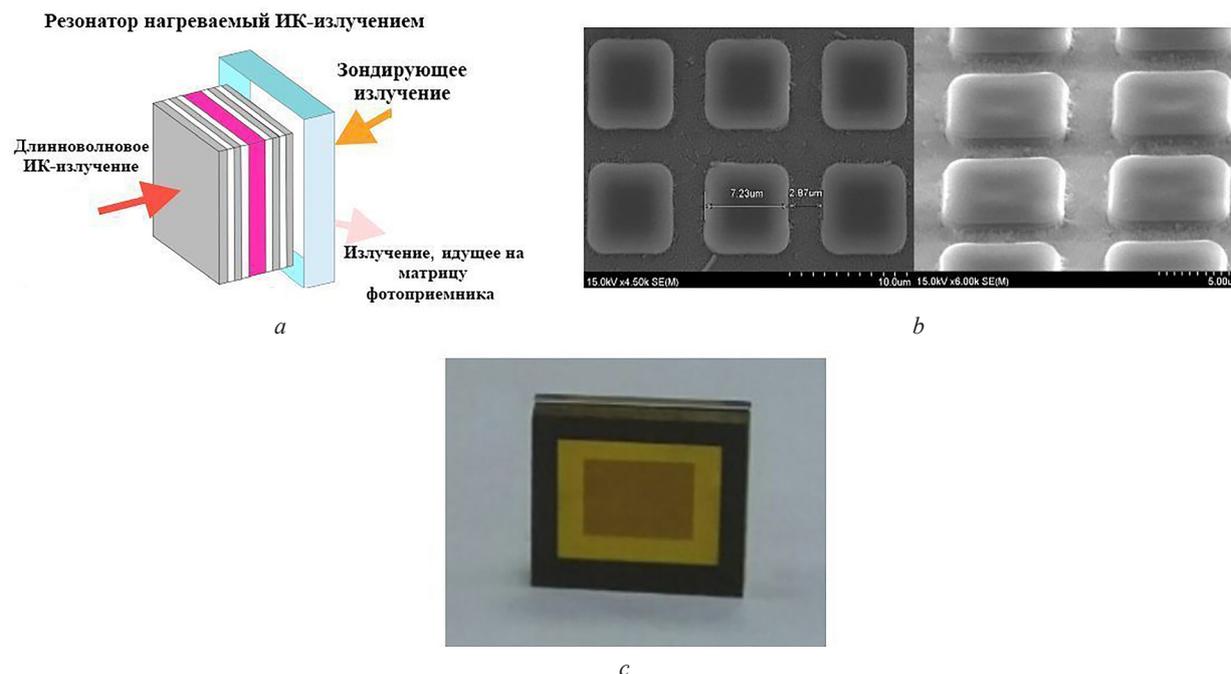


Рис. 1. Структура и принцип работы микрорезонатора Фабри–Перо (*a*), РЭМ изображение резонаторов-пикселей матрицы микрорезонатора Фабри–Перо (*b*), внешний вид экспериментального образца матрицы микрорезонатора Фабри–Перо (*c*)

Fig. 1. Structure and principle of operation of the Fabry–Perot microresonator (*a*), SEM image of the resonators-pixels of the Fabry–Perot microresonator array (*b*), appearance of the experimental sample of the Fabry–Perot microresonator array (*c*)

покрытий, последующей фотолитографии и плазмохимического травления с целью разделения получившегося «многослойного пирога» на отдельные структуры резонаторов Фабри–Перо, промежуточных испытаний и вакуумной герметизации.

Каждый микрорезонатор представляет собой многослойную слоистую структуру, состоящую из двух плоских зеркал и промежуточного слоя, являющегося оптической базой резонатора. Зеркала состоят из чередующихся слоев оксидов металлов с высоким и низким показателями преломления, с оптической толщиной, равной четверти длины волны. Между каждым микрорезонатором и подложкой находится теплоизолятор. Структура микрорезонатора Фабри–Перо изготавливалась методом электронно-лучевого напыления пленок оксидов металлов при температуре испарения более 1500 °С для получения однородных пленок, что трудно реализуемо другими способами испарения материалов. Контроль осаждения пленок оксидов металлов осуществляли методами оптического контроля и «кварцевых микровесов», которые позволяют контролировать толщину осаждаемых пленок с точностью 1 %. Формирование матрицы микрорезонаторов Фабри–Перо (резонаторов-пикселей) осуществляли с помощью контактной фотолитографии на линии «Лада электроника–75». Матрица микрорезонаторов создавалась в виде квадратных островков размером $8 \times 8 \text{ мкм}^2$ с зазором 2 мкм в количестве 640×480 штук (рис. 1, *b*). РЭМ изображение резонаторов-пикселей получено с помощью микроскопа «Hitachi S-4800» (рис. 1, *b*). На заключительном этапе изготовления экспериментального образца полученная матрица корпусировалась в вакууме совместно с окном пропускания в рабочем спектральном диапазоне, для защиты от внешнего воздействия окружающей среды (рис. 1, *c*).

Измерение зависимости коэффициента пропускания от длины волны получаемых микрорезонаторов производилось на приборе «Photon-RT» в спектральном диапазоне от 400 до 800 нм с шагом 0,25 нм. Для оценки термооптического эффекта полученных структур была разработана специализированная оснастка, которая позволяет прямо в камере спектрофотометра нагревать экспериментальный образец от комнатной температуры до 65 °С, с шагом 0,1 °С. Температура экспериментального образца контролировалась термодатчиком.

Результаты и их обсуждение. Изготовление экспериментального образца базировалось на разработанной математической модели стабилизации светомодуляционных характеристик матриц микрорезонаторов Фабри–Перо, предназначенных для преобразования ИК-излучения в видимое как в режиме пропускания, так и в режиме отражения зондирующего излучения [10]. Было показано, что для получения более температуростабильной работы резонатора Фабри–Перо, работающего в качестве преобразователя информации, необходимо, чтобы его начальная температура соответствовала экстремуму зависимости изменения светового потока от изменения температуры. Динамический температурный диапазон одного микрорезонатора может составлять, в зависимости от величины оптической базы резонатора, от десятых долей до одного градуса [10].

Одной из основных характеристик такой ИК-системы является крутизна преобразования ИК-излучения. Данный параметр определяется по алгоритму, описанному ниже.

Для оценки крутизны преобразования микрорезонатора требуется измерить спектральную зависимость коэффициента пропускания от длины волны $T(\lambda)$ при комнатной температуре (t_1). Также необходимо измерить пик коэффициента пропускания на промежутке $T(\lambda)$ и определить величину длины волны, соответствующую данному пику (λ_1) (рис. 2).

Затем требуется включить нагрев образца и дождаться повышения его температуры, например, на 20 °С, определить величины температуры после нагрева (t_2) и $T(\lambda)$. Далее необходимо измерить величину длины волны после нагрева, соответствующую пику коэффициента пропускания на λ_2 . Разность температур Δt и длин волн $\Delta \lambda$ определяется по формулам

$$\Delta t = t_2 - t_1,$$

$$\Delta \lambda = |\lambda_1 - \lambda_2|.$$

Для оценки крутизны преобразования ИК-излучения требуется найти наиболее линейный участок на спаде графика спектра пропускания, как это показано на рис. 2. Затем необходимо определить изменение длины волны $\Delta \lambda_1$ и величины коэффициента пропускания ΔT на данном участке. Крутизну преобразования инфракрасного излучения k_p можно найти по формуле

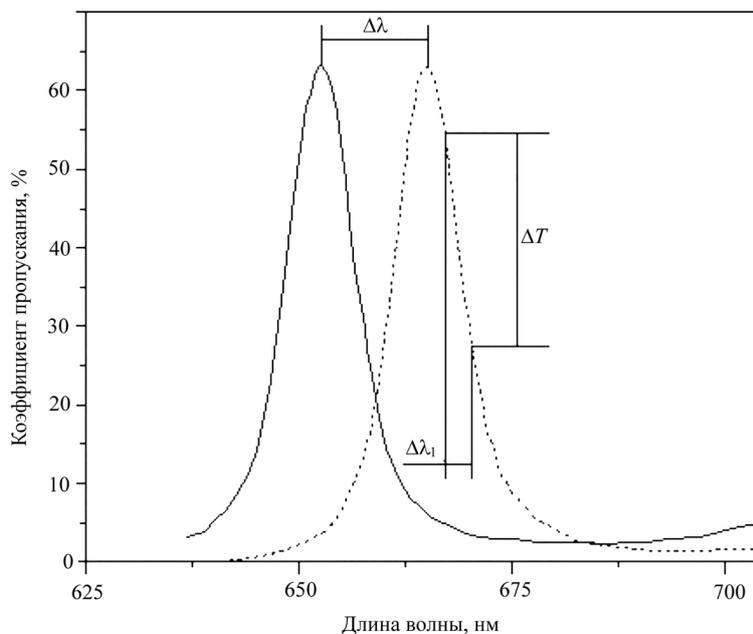


Рис. 2. Определение крутизны преобразования микрорезонатора Фабри–Перо по спектральным зависимостям коэффициента пропускания

Fig. 2. Determination of the steepness of the Fabry–Perot microresonator transformation from the spectral dependences of the transmittance coefficient

$$k_p = \frac{\Delta T k_T}{\Delta \lambda_1} k_c,$$

где k_T – коэффициент перестройки, определяемый как $\frac{\Delta \lambda}{10^3 K}$; k_c – коэффициент, учитывающий уменьшение интенсивности падающего излучения на рабочую поверхность микрорезонатора, величина которого определяется наличием светонепроницаемой области в зазоре между резонаторами-пикселями, и по оценке составляет $k_c = 3$.

На рис. 3 показаны характерные зависимости коэффициента пропускания от длины волны при двух температурах измерения экспериментального образца микрорезонатора Фабри–Перо (рис. 1, с).

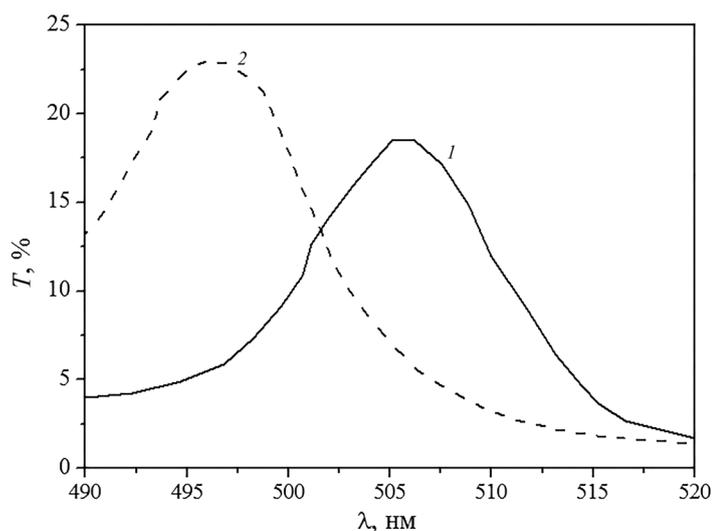


Рис. 3. Спектральные зависимости коэффициента пропускания экспериментального образца микрорезонатора Фабри–Перо при разных температурах измерения (1 – 25,9 °С, 2 – 45,9 °С)

Fig. 3. Spectral dependences of the transmittance coefficient of the experimental sample of the Fabry–Perot microresonator at different measurement temperatures (1 – 25.9 °C, 2 – 45.9 °C)

Для исследуемой ИК-системы, работающей на термооптическом эффекте, при нагреве экспериментального образца на 20 °С произошло смещение максимума спектральной зависимости коэффициента пропускания на промежутке длин волн от 480,0 до 530,0 нм на 8,80 нм. Аналогичные характеристики наблюдались и для серии экспериментальных образцов микрорезонаторов Фабри–Перо, что говорит о хорошей воспроизводимости результатов. По полученным экспериментальным результатам был произведен расчет крутизны преобразования.

Технические параметры, характерные для разработанных образцов микрорезонаторов Фабри–Перо, представлены в табл. 1. Из полученных данных был рассчитан коэффициент перестройки экспериментального образца микрорезонатора, который составил $k_T = 0,44$ нм/°С. Это значение

Т а б л и ц а 1. Технические параметры экспериментального образца микрорезонатора Фабри–Перо

Table 1. Technical parameters of the experimental sample of the Fabry–Perot microresonator

Параметр Parameter	Величина Value
Максимальный коэффициент пропускания резонатора-пикселя, %	70
Диапазон изменения рабочей температуры, °С	20
Температурный сдвиг максимума коэффициента пропускания на рабочей длине волны, нм	8,8
Крутизна преобразования ИК-излучения, %/°С	8,91
Коэффициент перестройки, нм/°С	0,44

в 7,33 раз превышает коэффициент перестройки фильтра, описанного в литературе [11], который составлял порядка 0,06 нм/°С.

Был проведен сравнительный анализ промышленно выпускаемых ИК-систем на базе микроболометрических матриц и экспериментального образца микрорезонатора Фабри–Перо. Данные результаты представлены в табл. 2. Матрицы фирм АТОМ 640 (Lynred, США) [2], TENUM™640 (Sierra-Olympic, США) [3] и TWV640 (BAE SYSTEMS, Великобритания) [4] разработаны на основе оксида ванадия и функционируют с использованием микроболометрических принципов преобразования ИК-излучения.

Т а б л и ц а 2. Параметры различных матриц ИК-систем

T a b l e 2. Parameters of various arrays of the IR systems

Тип матрицы ИК-системы, страна производства IR system matrix type, country of production	Разрешение матрицы Matrix resolution (H × V)	Размер пикселя, мкм Pixel size, μm	Тепловая чувствительность (NETD), мК Thermal sensitivity (NETD), mK	Рабочий спектральный диапазон, мкм Working spectral range, μm	Рабочая температура, °С Operating temperature, °C	Рабочее напряжение, В Operating voltage, V
АТОМ 640, США	640 × 480	12–17	<50	8–14	–40...–60	4,0–5,5
TENUM™640, США	640 × 512	10	<30	8–14	–40...+80	3,0–5,5
TWV640, Великобритания	640 × 480	12	<50	7,5–13,5	–40...–65	2,0–3,8
Микрорезонатор Фабри–Перо (ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»)	640 × 480	8	<50	8–14	–30...+50	4,0–5,5

Крутизна преобразования разработанной ИК-системы, определяемая изменением коэффициента пропускания резонатора-пикселя, приходящимся на 1 К изменения температуры, составляет от 6 до 9 %, что гораздо выше температурных коэффициентов сопротивления материалов традиционных микроболометров (2,7 % для оксидов ванадия и 1,5 % для аморфного кремния). Необходимо отметить, что в разработанной ИК-системе отсутствуют проводниковые соединения со схемой считывания: это снижает уровень шума и дает возможность увеличить коэффициент годных пикселей, превышающий 98 %. Для получения температуростабильной работы разработанной ИК-системы в диапазоне отрицательных температур окружающей среды необходимо использование термостабилизирующего кожуха.

Таким образом можно отметить, что разработанная ИК-система по своим основным параметрам не уступает имеющимся мировым аналогам.

Заключение. Исследована принципиальная конструкция преобразователя ИК-излучения в видимое на основе микрорезонаторов Фабри–Перо. На основании проведенных экспериментальных исследований по реализации микрорезонаторов Фабри–Перо изучены и отработаны методы формирования многослойных матричных элементов из оксидов металлов, что обеспечивает воспроизводимость технологии от процесса к процессу. По отработанной технологии изготовлена матрица микрорезонаторов Фабри–Перо с резонаторами-пикселями в виде квадратов 8×8 мкм² с зазором 2 мкм в количестве 640 × 480 шт. Получен экспериментальный образец ИК-системы на базе матрицы микрорезонаторов Фабри–Перо с приемлемыми характеристиками. Коэффициент перестройки экспериментального образца микрорезонатора Фабри–Перо составил $k_T = 0,44$ нм/°С, а крутизна преобразования 8,91 %/°С.

Таким образом, разработанная ИК-система термовизуализации не уступает тепловизионным системам сопоставимого класса (болометрическим) по основным параметрам (размер пикселя, разрешение матрицы, рабочий спектральный диапазон), а стоимость изготовления, в случае серийного выпуска, такой системы ниже (за счет меньшего количества фотолитографических процессов, 3 против 12), что открывает новые возможности для развития тепловизионной техники.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Тарасов, В. В. Инфракрасные системы «смотрящего» типа / В. В. Тарасов, Ю. Г. Якушенко. – М., 2004. – 480 с.
2. Тарасов, В. В. Инфракрасные системы 3-го поколения / В. В. Тарасов, Ю. Г. Якушенко. – М., 2011. – 242 с.
3. Тарасов, В. В. Современные проблемы инфракрасной техники / В. В. Тарасов, Ю. Г. Якушенко. – М., 2011. – 84 с.
4. Ostrower, D. Optical Thermal Imaging-replacing microbolometer technology and achieving universal deployment / D. Ostrower // *III-Vs Review*. – 2006. – Vol. 19, N 6. – P. 24–27. [https://doi.org/10.1016/s0961-1290\(06\)71764-1](https://doi.org/10.1016/s0961-1290(06)71764-1)
5. Novel Low-Cost Uncooled Infrared Camera / M. Wu [et al.] // *Infrared Technology and Applications XXXI* / ed. B. F. Andresen, G. F. Fulop. – Bellingham, 2005. – Vol. 5783. – P. 496–505. <https://doi.org/10.1117/12.603905>
6. Infrared camera system: pat. US 2007/0023661 A1 / M. Wagner, M. Wu, N. Nemchuk, J. Cook, R. DeVito, R. Murano, L. Domash. – Publ. date: 01.02.2007.
7. ATTO640™ – Infrared sensor [Electronic resource] // LYNRED-USA. Official website. – Mode of access: <https://www.lynred-usa.com/products/vga-resolution/atto640-infrared-sensors.html>. – Date of access: 02.04.2022.
8. TENUM® 640 10 micron pixel pitch LWIR [Electronic resource] // Sierra-Olympic Technologies. Official website. – Mode of access: <https://sierraolympic.com/thermal-cameras-lwir/tenum-640/>. – Date of access: 02.04.2022.
9. TWV640 Thermal Camera Core [Electronic resource] // BAE Systems. Official website. – Mode of access: <https://www.baesystems.com/en/product/twv640-thermal-camera-core>. – Date of access: 02.04.2022.
10. Преобразователь ИК излучения на базе микрорезонаторов Фабри–Перо / В. Б. Залесский [и др.] // Докл. БГУИР. – 2018. – № 8 (118). – С. 24–29.
11. Erdtmann, M. Uncooled dual-band MWIR/LWIR optical readout imager / M. Erdtmann, L. Zhang, G. Jin // *Infrared Technology and Applications XXXIV* / ed. B. F. Andresen, G. F. Fulop, P. R. Norton. – Orlando, 2008. – Vol. 6940. – P. 1–11. <https://doi.org/10.1117/12.781886>

References

1. Tarasov V. V., Yakushenkov Yu. G. *Infrared systems of “looking” type*. Moscow, 2004. 480 p. (in Russian).
2. Tarasov V. V., Yakushenkov Yu. G. *Third generation infrared systems*. Moscow, 2011. 242 p. (in Russian).
3. Tarasov V. V., Yakushenkov Yu. G. *Modern problems of infrared technology*. Moscow, 2011. 84 p. (in Russian).
4. Ostrower D. Optical Thermal Imaging-replacing microbolometer technology and achieving universal deployment. *III-Vs Review*, 2006, vol. 19, no. 6, pp. 24–27. [https://doi.org/10.1016/s0961-1290\(06\)71764-1](https://doi.org/10.1016/s0961-1290(06)71764-1)
5. Wu M., Cook J., DeVito R., Li J., Ma E., Murano R., Nemchuk N., Tabasky M., Wagner M. Novel Low-Cost Uncooled Infrared Camera. Andresen B. F., Fulop G. F., ed. *Infrared Technology and Applications XXXI*. Bellingham, 2005, vol. 5783, pp. 496–505. <https://doi.org/10.1117/12.603905>
6. Wagner M., Wu M., Nemchuk N., Cook J., DeVito R., Murano R., Domash L. *Infrared camera system*: patent US 2007/0023661 A1. Publication date: 01 February 2007.
7. ATTO640™ – Infrared sensor (2022). Available at: <https://www.lynred-usa.com/products/vga-resolution/atto640-infrared-sensors.html> (accessed 02 April 2022).
8. TENUM® 640 10 micron pixel pitch LWIR (2022). Available at: <https://sierraolympic.com/thermal-cameras-lwir/tenum-640/> (accessed 02 April 2022).
9. TWV640 Thermal Camera Core (2022). Available at: <https://www.baesystems.com/en/product/twv640-thermal-camera-core> (accessed 02 April 2022).
10. Zalesski V. B., Konojko A. I., Kravchenko V. M., Reshikov C. A. Infrared radiation converter based on Fabry–Perot microresonators. *Doklady BGUIR*, 2018, no. 8, pp. 24–29 (in Russian).
11. Erdtmann M., Zhang L., Jin G. Uncooled dual-band MWIR/LWIR optical readout imager. Andresen B. F., Fulop G. F., Norton P. R., ed. *Infrared Technology and Applications XXXIV*. Orlando, 2008, vol. 6940, pp. 1–11. <https://doi.org/10.1117/12.781886>

Информация об авторах

Кравченко Владимир Михайлович – канд. техн. наук, вед. науч. сотрудник. ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» (пр. Независимости, 68-1, 220072, Минск, Республика Беларусь).

Коновко Алексей Иванович – канд. физ.-мат. наук, доцент, ст. науч. сотрудник. ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» (пр. Независимости, 68-1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: kon54@yandex.by.

Кузьмицкая Анна Сергеевна – мл. науч. сотрудник. ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» (пр. Независимости, 68-1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: mickevichhanna@gmail.com. ORCID: 0000-0002-7074-0034.

Малютина-Бронская Виктория Владимировна – заместитель заведующего лабораторией. ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» (пр. Независимости, 68-1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: malyutina@oelt.basnet.by. ORCID: 0000-0003-2788-4945.

Information about the authors

Kravchenko Vladimir M. – Ph. D. (Engineering), Leading Researcher. Optics, Optoelectronics and Laser Technology (68-1, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus).

Konojko Aleksey I. – Ph. D. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Senior Researcher. Optics, Optoelectronics and Laser Technology (68-1, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kon54@yandex.by.

Kuzmitskaya Hanna S. – Junior Researcher. Optics, Optoelectronics and Laser Technology (68-1, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: mickevichhanna@gmail.com. ORCID: 0000-0002-7074-0034.

Malyutina-Bronskaya Viktoria V. – Deputy Head of the Laboratory. Optics, Optoelectronics and Laser Technology (68-1, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: malyutina@oelt.basnet.by. ORCID: 0000-0003-2788-4945.

ISSN 1561-8323 (Print)
ISSN 2524-2431 (Online)

ХИМИЯ
CHEMISTRY

УДК 548.736.64:621.357.77
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-3-287-293>

Поступило в редакцию 10.05.2022
Received 10.05.2022

**А. С. Логвинович¹, Т. В. Свиридова¹, Е. В. Скорб²,
член-корреспондент Д. В. Свиридов¹, академик В. Е. Агабеков³**

¹Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

²Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Российская Федерация

³Институт химии новых материалов Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь

**СОЗДАНИЕ pH-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ АНТИКОРРОЗИОННЫХ
КОНТЕЙНЕРНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ЧАСТИЦ ИНТЕРКАЛИРОВАННОГО
АЗОЛОМ ОКСИДА МОЛИБДЕНА С ОЛИГООКСОМЕТАЛЛАТНОЙ ОБОЛОЧКОЙ**

Аннотация. С использованием процессов поликонденсации оксосоединений синтезированы контейнерные структуры в виде ядра из слоистого триоксида молибдена, интеркалированного 3-амино-1,2,4-триазолом (ингибитор коррозии), на поверхность которого нанесена оболочка из полимеризованной вольфрамовой кислоты. Показано, что в кислой (pH < 5,5) и щелочной (pH > 8,5) среде сплошность оболочки обратимо нарушается, что позволяет инкапсулированному содержимому выделяться в окружающую среду. Наличие у оксометаллатной оболочки собственной редокс-активности позволяет иммобилизовать содержащиеся ингибитор контейнерные структуры за счет электрохимического соосаждения с никелем, а возможность открытия контейнеров в результате изменения локальных значений pH при протекании коррозионного процесса обеспечивает автономную антикоррозионную защиту полученных металл-матричных покрытий.

Ключевые слова: контейнерные системы, оксид молибдена, оксид вольфрама, металл-матричные композиты

Для цитирования. Создание pH-чувствительных антикоррозионных контейнерных систем на основе частиц интеркалированного азолом оксида молибдена с олигooksометаллатной оболочкой / А. С. Логвинович [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2022. – Т. 66, № 3. – С. 287–293. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-3-287-293>

**Alexander S. Logvinovich¹, Tatiana V. Sviridova¹, Ekaterina V. Skorb²,
Corresponding Member Dmitry V. Sviridov¹, Academician Vladimir E. Agabekov³**

¹Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

²ITMO University, Saint Petersburg, Russian Federation

³Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

**CREATING THE pH-SENSITIVE CORROSION-INHIBITING CONTAINER STRUCTURES BASED
ON THE AZOLE-INTERCALATED MOLYBDENUM OXIDE PARTICLES
WITH OLIGOOXOMETALATE SHELL**

Abstract. The container structures consisting of the core made of layered molybdenum oxide intercalated with 3-amino-1,2,4-triazole (it behaves as the corrosion inhibitor) capped with the shell made of polymerized tungsten oxide were synthesized employing the polycondensation of oxocompounds. It is shown that in the acid (pH < 5.5) and alkali (pH > 8.5) media, the coating continuity appears to be broken reversibly, which facilitates the emission of the encapsulated compounds from the containers. The intrinsic redox activity inherent into the oligooxometalate shell permits one to immobilize the synthesized containers by co-precipitation with galvanic nickel, whereas the possibility to open the container as a result of local pH value variations accompanying the corrosion process ensures the autonomic corrosion protection of the resultant metal-matrix coatings.

Keywords: container systems, molybdenum oxide, tungsten oxide, metal-matrix-composite

For citation. Logvinovich A. S., Sviridova T. V., Skorb E. V., Sviridov D. V., Agabekov V. E. Creating the pH-sensitive corrosion-inhibiting container structures based on the azole-intercalated molybdenum oxide particles with oligooxometalate shell. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2022, vol. 66, no. 3, pp. 287–293 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-3-287-293>

Введение. Одним из наиболее эффективных подходов к решению проблемы защиты металлов от коррозии является создание автономных защитно-коррозионных систем, способных выделять соединения-ингибиторы непосредственно при протекании коррозионного процесса [1]. Системы такого рода, как правило, базируются на использовании рН-чувствительных контейнерных структур в виде полиэлектролитных капсул [2; 3], открывающихся при локальном изменении кислотности в местах развития коррозионного процесса (прежде всего, в области трещин, проколов и других дефектов защитного покрытия). В случае защитно-коррозионных систем такого рода формируется специфическая отрицательная обратная связь: протекание коррозионного процесса инициирует конформационные превращения в полиэлектролитных оболочках контейнеров, обеспечивающие их открытие и выделение инкапсулированных ингибиторов, результатом чего является подавление коррозии. Такие рН-управляемые контейнеры являются принципиально более эффективными по сравнению с простыми безоболочечными структурами с «прямым истечением», например, на основе слоистых гидроксидов, содержащих в межслоевом объеме ингибиторы коррозии [4]. В то же время полиэлектролитные оболочки рН-управляемых контейнерных структур (ядра которых, как правило, представляют собой частицы мезопористых оксидов синтетического [5] либо природного [6] происхождения) затрудняют встраивание полученных полиэлектролитных контейнеров в защитные покрытия. Все это определяет актуальность создания контейнерных структур на основе неорганических соединений, хорошо совместимых с матричным материалом защитных покрытий (в том числе, представляющих собой пленку гальванически осажденного металла) и при этом способных надежно удерживать во внутреннем объеме органические соединения – ингибиторы коррозии.

Целью настоящего исследования являлось создание рН-управляемых контейнеров, в которых в качестве контейнерного ядра используются частицы слоистого триоксида молибдена с интеркалированным 3-амино-1,2,4-триазолом (выступает в роли ингибитора коррозии [7]), на поверхность которых нанесена олигооксовольфраматная оболочка, причем и ядро, и оболочка получены методами поликонденсационного синтеза.

Материалы и методы исследования. Использованные в работе контейнерные структуры, построенные по схеме «ядро–оболочка», были получены путем осаждения продуктов полимеризации вольфрамовой кислоты (синтезирована методом ионного обмена) на поверхность ядер из слоистого триоксида молибдена, содержащего в своем межслоевом объеме 3-амино-1,2,4-триазол (АТА). Интеркалированный АТА триоксид молибдена (представляющий собой по данным рентгенофазового анализа смесь гексагонального и триклинного MoO_3) выращивался в сольвотермических условиях [8; 9] при 100 °С в 0,5 М растворе молибденовой кислоты, содержащем 0,05 г/л АТА. Продолжительность синтеза, обеспечивающая получение частиц MoO_3 :АТА со средним размером 8 мкм, составляла 4 ч. Содержание АТА в полученном таким образом интеркалированном MoO_3 достигало 56 мол. % (определялось фотометрически на длине волны $\lambda = 271$ нм с использованием спектрофотометра Shimadzu UV-2550 после растворения оксидного каркаса в аммиачном растворе). Выращивание олигооксовольфраматных оболочек на поверхности синтезированных ядер осуществлялось методом сольвотермического осаждения [8] из 0,1 М раствора вольфрамовой кислоты при 50 °С в течение 30 мин (схема получения контейнерных структур MoO_3 :АТА/ WO_3 представлена на рис. 1). Для сравнения аналогичная оболочка была выращена на поверхности частиц гексагонального MoO_3 , синтезированных сольвотермическим методом в тех же условиях, что и дисперсный MoO_3 :АТА.

Способность полученных контейнерных структур MoO_3 :АТА(ядро)/ WO_3 (оболочка) к удерживанию АТА и его выделению в контактирующий электролит с различным уровнем кислотности определялась фотометрически. Инфракрасные спектры контейнерных частиц регистрировались с помощью спектрометра Shimadzu IRTracer-100; для исследования их морфологии использовался сканирующий электронный микроскоп LEO 1420. Частицы MoO_3 :АТА/ WO_3 вводились в электролит гальванического осаждения никеля ($\text{NiSO}_4 - 200$ г/дм³, $\text{NiCl}_2 - 50$ г/дм³, $\text{H}_3\text{BO}_3 - 35$ г/дм³ [10]) в количестве 0,1 г/дм³. Затем из полученного суспензионного электролита при плотности тока 2,0 А/дм² и постоянном перемешивании на медную подложку осаждался никель-матричный композит в виде пленки толщиной 20 мкм. Содержание инкорпорированных

гибридных частиц $\text{MoO}_3\text{:ATA/WO}_3$ в композите составляло 1–2 мас. % (в расчете на MoO_3). Коррозионные свойства полученных композиционных покрытий, содержащих частицы $\text{MoO}_3\text{:ATA/WO}_3$, исследовались в растворе NaCl (3 мас. %) методом импедансной спектроскопии с использованием потенциостата/гальваностата Autolab PGSTAT204 с импедансным модулем FRA32.

Результаты и их обсуждение. При поликонденсации вольфрамовой кислоты на поверхности частиц $\text{MoO}_3\text{:ATA}$ наблюдается образование сплошной олигооксвольфраматной оболочки (рис. 1), чему должна способствовать характерная для вольфрамовой кислоты способность к 3D полимеризации [11].

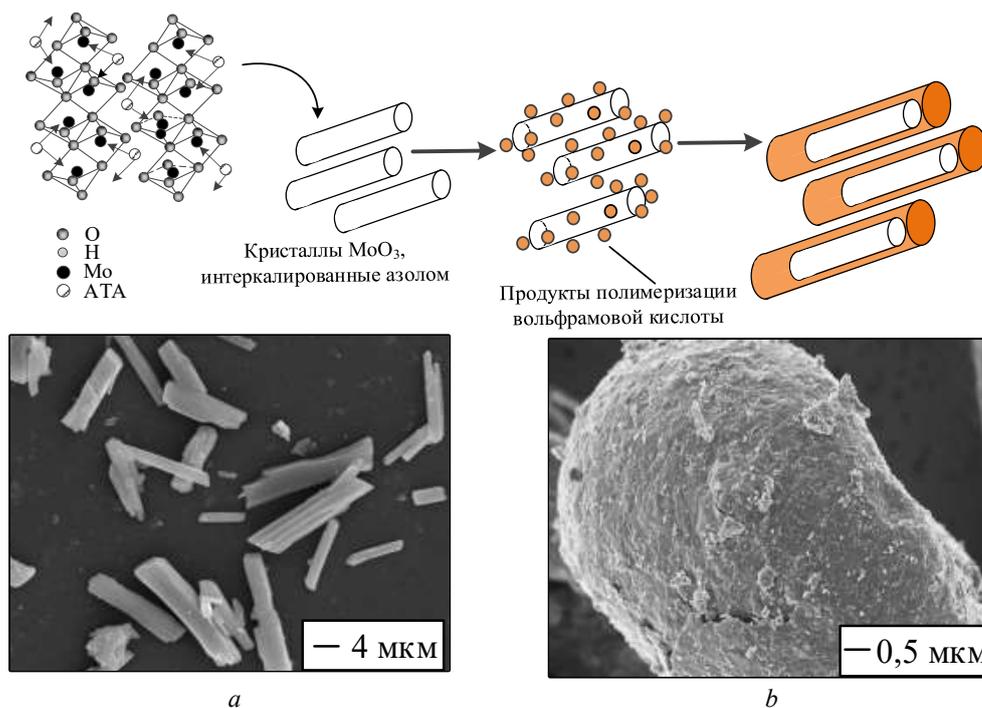


Рис. 1. Схема получения частиц $\text{MoO}_3\text{:ATA/WO}_3$ со структурой «ядро–оболочка». Ниже приведены электронно-микроскопические изображения (сканирующая электронная микроскопия) частиц триоксида молибдена, интеркалированных АТА, полученных до (а) и после (b) осаждения оболочек из олигооксометаллата

Fig. 1. Scheme of growing of $\text{MoO}_3\text{:ATA/WO}_3$ particles with structure of core-shell type. Below: SEM images of molybdenum oxide particles intercalated with ATA (a) before and (b) after deposition of oligooxometalate shell

Исследование удерживающей способности частиц $\text{MoO}_3\text{:ATA}$ показало, что в контакте с водной средой последние теряют интеркалированный азол (рис. 2, а), причем в кислой ($\text{pH} < 4$) и щелочной ($\text{pH} > 8$) среде скорость выделения АТА возрастает, что является следствием частичного растворения оксидного каркаса. В то же время нанесение оболочки из продуктов конденсации вольфрамовой оксокислоты полностью блокирует выделение интеркалированного азота из ядра в диапазоне $\text{pH} 5,5\text{--}8,5$ (рис. 2, а).

С другой стороны, при больших ($\text{pH} < 5,5$) и меньших ($\text{pH} > 8,5$) значениях кислотности среды наблюдается выделение АТА из ядра контейнерной структуры $\text{MoO}_3\text{:ATA/WO}_3$ (хотя и с меньшей скоростью, чем в случае исходных частиц $\text{MoO}_3\text{:ATA}$). Следствием этого является характерная колоколообразная pH -зависимость скорости истечения инкапсулированного соединения, аналогичная наблюдающейся в случае традиционных полиэлектролитных капсул на основе органических полимеров [12]. В отличие от формирующих такие капсулы электростатических ассоциатов полианионов и поликатионов, претерпевающих при изменении pH конформационные превращения, которые приводят к изменению проницаемости полиэлектролитных оболочек, открытие контейнерных структур с оболочкой на основе продуктов полимеризации оксокислоты связано с превращениями диссоциативного типа. Указанные превращения сопровождаются

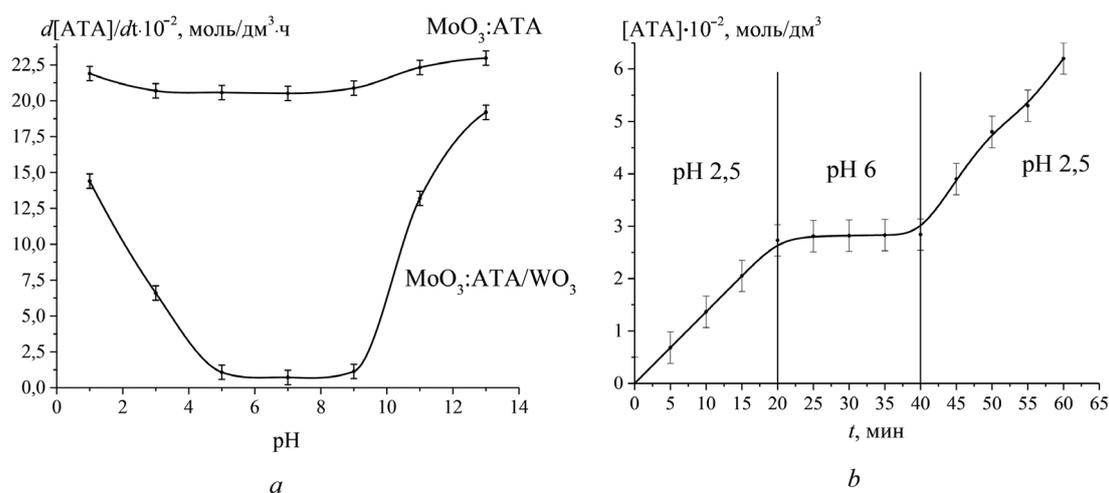


Рис. 2. Зависимость скорости выделения АТА из частиц $MoO_3:ATA$ и $MoO_3:ATA/WO_3$ от кислотности контактирующего раствора (а); количество АТА, перешедшего из частиц $MoO_3:ATA/WO_3$ в раствор при изменении кислотности среды (б)

Fig. 2. The rate of ATA emission from $MoO_3:ATA$ and $MoO_3:ATA/WO_3$ particles as a function of the acidity of contacting solution (a); the amount of ATA leaving $MoO_3:ATA/WO_3$ particles due to variations of acidity (b)

уменьшением компактности олигооксометаллатной оболочки, но не приводят к ее полной деградации (проницаемость оболочки снижается при изменении pH от 2,5 до 6 и восстанавливается при повторном снижении кислотности среды до pH 2,5 (рис. 2, б)).

Сохранению олигооксометаллатной оболочки способствует ее химическая пришивка к ядру на стадии сольвотермического осаждения продуктов полимеризации вольфрамовой кислоты, о чем свидетельствует наличие в ИК-спектре частиц $MoO_3:ATA/WO_3$ полосы поглощения в области 770 см^{-1} , соответствующей колебаниям связи $-Mo-O-W-$ (рис. 3).

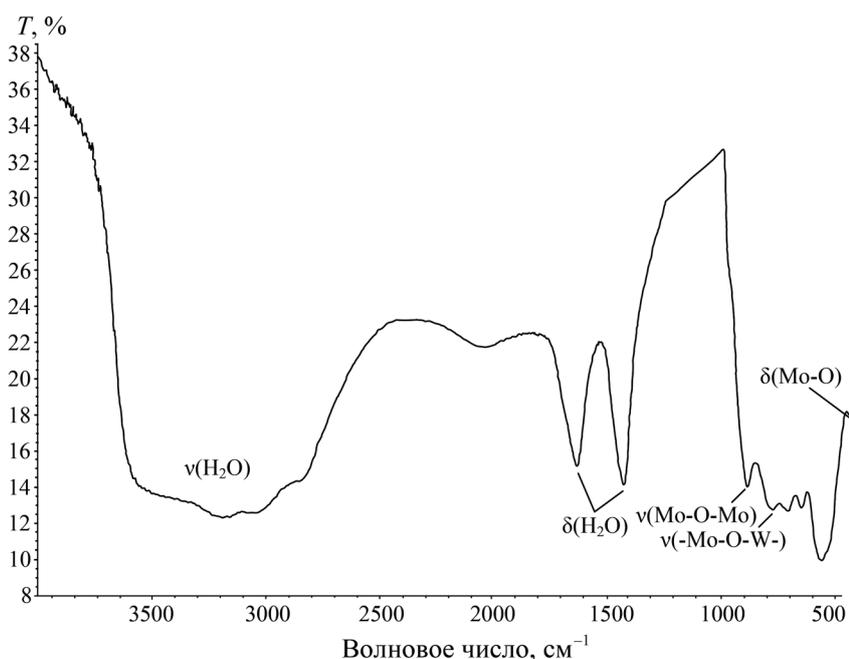


Рис. 3. ИК-спектр частиц $MoO_3:ATA/WO_3$

Fig. 3. IR-spectrum of $MoO_3:ATA/WO_3$

Продукты поликонденсации вольфрамовой кислоты, формирующие оболочку контейнерной структуры $\text{MoO}_3\text{:ATA/WO}_3$, обладают выраженной редокс-активностью [13], что создает благоприятные условия для их соосаждения с гальваническим никелем, осуществляющегося в этом случае по редокс-механизму [14; 15]. Возможность реализации указанного механизма обеспечивает эффективный захват оксидных частиц гальваническим осадком, что позволяет проводить осаждение никель-матричного композита с высоким содержанием инкорпорированных частиц $\text{MoO}_3\text{:ATA/WO}_3$ (достигающим 1,8 мас. %) из разбавленного суспензионного электролита. Полученное в результате электрохимического осаждения никель-матричное покрытие обеспечивает высокий уровень защиты от химической коррозии в контакте с депассивирующими водными растворами. Спектры электрохимического импеданса, полученные в хлоридном электролите (рис. 4), свидетельствуют о том, что при переходе от гальванического никелевого покрытия к композиционному покрытию $\text{Ni-MoO}_3\text{:ATA/WO}_3$ наблюдается резкое повышение величины сопротивления переносу заряда и, следовательно, подавление коррозионного процесса. Указанный эффект обусловлен выделением инкапсулированного ингибитора коррозии из контейнерных структур при изменении pH поверхности в результате развития коррозии. Дополнительную роль в подавлении коррозионного процесса могут также играть продукты деполимеризации образующих контейнерные структуры материалов (поливольфраматы и полимолибдаты), обладающие самостоятельным ингибирующим действием [15]. О наличии эффектов такого рода свидетельствует наблюдающееся в импедансных спектрах дополнительное увеличение электрического сопротивления переносу заряда при включении частиц $\text{MoO}_3\text{/WO}_3$ в пленку гальванического никеля (рис. 4).

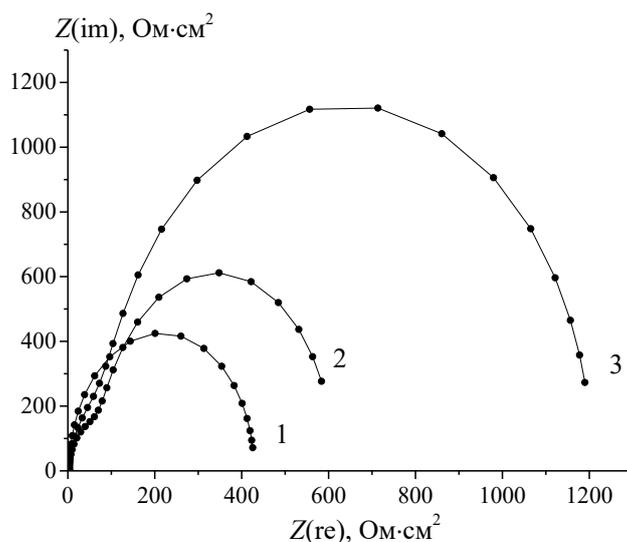


Рис. 4. Спектр импеданса в координатах Найквиста для пленок гальванического никеля (1), никель-матричных композитов $\text{Ni-MoO}_3\text{/WO}_3$ (2) и $\text{Ni-MoO}_3\text{:ATA/WO}_3$ (3)

Fig. 4. Nyquist plots for: galvanic nickel (1); nickel-matrix composite $\text{Ni-MoO}_3\text{/WO}_3$ (2); nickel-matrix composite $\text{Ni-MoO}_3\text{:ATA/WO}_3$ (3)

Таким образом, использование в качестве основы контейнерной структуры частиц интеркалированных азолами оксидов и формирование на их поверхности pH-чувствительных оболочек за счет поликонденсации вольфрамовой кислоты открывает возможность создания защитных покрытий в виде композитов (в том числе металл-матричных), способных выделять ингибитор коррозии в условиях развития коррозионного процесса. Такой подход, в силу своей универсальности, может быть использован для создания полифункциональных контейнерных покрытий, являющихся носителями различных соединений: ингибиторов коррозии, индикаторов развития коррозионного процесса, биоцидных соединений, обеспечивающих подавление биокоррозии.

Благодарности. Работа выполнена в рамках проекта БРФФИ (грант X20P-073). Е. В. Скорб выражает признательность РФФИ за поддержку (грант 20-53-00043).

Acknowledgements. The work was carried out within the framework of the BRFFR (grant no. X20P-073). E. V. Skorob is grateful to the RFBR for support (grant no. 20-53-00043).

Список использованных источников

1. Nazeer, A. A. Potential use of smart coatings for corrosion protection of metals and alloys: A review / A. A. Nazeer, M. Madkour // *J. Mol. Liq.* – 2018. – Vol. 253. – P. 11–22. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.01.027>
2. Layer-by-layer assembled nanocontainers for self-healing corrosion protection / D. G. Shchukin [et al.] // *Adv. Mater.* – 2006. – Vol. 18, N 13. – P. 1672–1678. <https://doi.org/10.1002/adma.200502053>
3. Oxide nanoparticle reservoirs for storage and prolonged release of the corrosion inhibitors / M. L. Zheludkevich [et al.] // *Electrochem. Commun.* – 2005. – Vol. 7, N 8. – P. 836–840. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2005.04.039>
4. Novel inorganic host layered double hydroxides intercalated with guest organic inhibitors for anticorrosion applications / S. K. Poznyak [et al.] // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* – 2009. – Vol. 1, N 10. – P. 2353–2362. <https://doi.org/10.1021/am900495r>
5. pH-Responsive zeolitic imidazole framework nanoparticles with high active inhibitor content for self-healing anticorrosion coatings / S. Yang [et al.] // *Colloids Surf., A.* – 2018. – Vol. 555. – P. 18–26. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2018.06.035>
6. Comparative study of the effect of halloysite nanocontainers on autonomic corrosion protection of polyepoxy coatings on steel by salt-spray tests / E. Shchukina [et al.] // *Prog. Org. Coat.* – 2017. – Vol. 108. – P. 84–89. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2017.03.018>
7. Corrosion inhibition and adsorption properties of 3-amino-1,2,3-triazole on mild steel in H_3PO_4 / L. Malki Alaoui [et al.] // *Pharm. Chem.* – 2011. – Vol. 3. – P. 353–360.
8. Solvothermally-derived MoO_3 -benzotriazole hybrid structures for nanocontainer depot systems / A. S. Logvinovich [et al.] // *New J. Chem.* – 2020. – Vol. 44, N 26. – P. 11131–11136. <https://doi.org/10.1039/d0nj02326d>
9. EPR Study on the intercalation of azoles into transition metal oxides / E. A. Konstantinova [et al.] // *Appl. Magn. Reson.* – 2020. – Vol. 51, N 9–10. – P. 1079–1092. <https://doi.org/10.1007/s00723-020-01205-1>
10. Lowenheim, F. A. Modern electroplating / F. A. Lowenheim, J. Davis // *J. Electrochem. Soc.* – 1974. – Vol. 121, N 12. – P. 397C. <https://doi.org/10.1149/1.2402361>
11. Sviridova, T. V. Nano- and microcrystals of molybdenum trioxide and metal–matrix composites on their basis / T. V. Sviridova, L. I. Stepanova, D. V. Sviridov // *Molybdenum: Characteristics, Production and Applications* / ed. by M. Ortiz [et al.]. – New York, 2012. – P. 147–179.
12. pH-Controlled macromolecule encapsulation in and release from polyelectrolyte multilayer nanocapsules / G. B. Sukhorukov [et al.] // *Macromol. Rapid Commun.* – 2001. – Vol. 22, N 1. – P. 44–46. [https://doi.org/10.1002/1521-3927\(20010101\)22:1%3C44::aid-marc44%3E3.0.co;2-u](https://doi.org/10.1002/1521-3927(20010101)22:1%3C44::aid-marc44%3E3.0.co;2-u)
13. Nanoengineered thin-film $TiO_2/h-MoO_3$ photocatalysts capable to accumulate photoinduced charge / T. V. Sviridova [et al.] // *J. Photochem. Photobiol., A.* – 2016. – Vol. 327. – P. 44–50. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2016.04.018>
14. Sviridova, T. V. Electrochemical synthesis of Ni– MoO_3 composite films: redox-mediated mechanism of electrochemical growth of metal–matrix composite / T. V. Sviridova, L. I. Stepanova, D. V. Sviridov // *J. Solid State Electrochem.* – 2012. – Vol. 16, N 12. – P. 3799–3803. <https://doi.org/10.1007/s10008-012-1816-2>
15. Sviridova, T. V. Electrochemical growing of Ni– MoO_3 nanocomposite coatings via redox mechanism / T. V. Sviridova, A. S. Logvinovich, D. V. Sviridov // *Surf. Coat. Technol.* – 2017. – Vol. 319. – P. 6–11. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.03.041>

References

1. Nazeer A. A., Madkour M. Potential use of smart coatings for corrosion protection of metals and alloys: A review. *Journal of Molecular Liquids*, 2018, vol. 253, pp. 11–22. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.01.027>
2. Shchukin D. G., Zheludkevich M., Yasakau K., Lamaka S., Ferreira M. G. S., Mohwald H. Layer-by-layer assembled nanocontainers for self-healing corrosion protection. *Advanced Materials*, 2006, vol. 18, no. 13, pp. 1672–1678. <https://doi.org/10.1002/adma.200502053>
3. Zheludkevich M. L., Serra R., Montemor M. F., Ferreira M. G. Oxide nanoparticle reservoirs for storage and prolonged release of the corrosion inhibitors. *Electrochemistry Communications*, 2005, vol. 7, no. 8, pp. 836–840. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2005.04.039>
4. Poznyak S. K., Tedim J., Rodrigues L. M., Salak A. N., Zheludkevich M. L., Dick L. F. P., Ferreira M. G. S. Novel inorganic host layered double hydroxides intercalated with guest organic inhibitors for anticorrosion applications. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2009, vol. 1, no. 10, pp. 2353–2362. <https://doi.org/10.1021/am900495r>
5. Yang S., Wang J., Mao W., Zhang D., Guo Y., Song Y., Wang J.-P., Li G. L. pH-Responsive zeolitic imidazole framework nanoparticles with high active inhibitor content for self-healing anticorrosion coatings. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2018, vol. 555, pp. 18–26. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2018.06.035>
6. Shchukina E., Grigoriev D., Sviridova T., Shchukin D. Comparative study of the effect of halloysite nanocontainers on autonomic corrosion protection of polyepoxy coatings on steel by salt-spray tests. *Progress in Organic Coatings*, 2017, vol. 108, pp. 84–89. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2017.03.018>
7. Malki Alaoui L., Hammouti B., Bellaouchou A., Benbachir A., Guenbour A., Kertit S. Corrosion inhibition and adsorption properties of 3-amino-1,2,3-triazole on mild steel in H_3PO_4 . *Pharmaceutical Chemistry*, 2011, vol. 3, pp. 353–360.

8. Logvinovich A. S., Sviridova T. V., Konstantinova E. A., Kokorin A. I., Sviridov D. V. Solvothermally-derived MoO₃-benzotriazole hybrid structures for nanocontainer depot systems. *New Journal of Chemistry*, 2020, vol. 44, no. 26, pp. 11131–11136. <https://doi.org/10.1039/d0nj02326d>
9. Konstantinova E. A., Kokorin A. I., Logvinovich A. S., Sviridova T. V., Degtyarev E. N., Sviridov D. V. EPR Study on the intercalation of azoles into transition metal oxides. *Applied Magnetic Resonance*, 2020, vol. 51, no. 9–10, pp. 1079–1092. <https://doi.org/10.1007/s00723-020-01205-1>
10. Lowenheim F. A., Davis J. Modern electroplating. *Journal of Electrochemical Society*, 1974, vol. 121, no. 12, pp. 397C. <https://doi.org/10.1149/1.2402361>
11. Sviridova T. V., Stepanova L. I., Sviridov D. V. Nano- and microcrystals of molybdenum trioxide and metal–matrix composites on their basis. Ortiz M. [et al.], ed. *Molybdenum: Characteristics, Production and Applications*. New York, 2012, pp. 147–179.
12. Sukhorukov G. B., Antipov A. A., Voight A., Donath E., Mohwald H. pH-Controlled macromolecule encapsulation in and release from polyelectrolyte multilayer nanocapsules. *Macromolecular Rapid Communications*, 2001, vol. 22, no. 1, pp. 44–46. [https://doi.org/10.1002/1521-3927\(20010101\)22:1%3C44::aid-marc44%3E3.0.co;2-u](https://doi.org/10.1002/1521-3927(20010101)22:1%3C44::aid-marc44%3E3.0.co;2-u)
13. Sviridova T. V., Sadovskaya L. Y., Shchukina E. M., Logvinovich A. S., Shchukin D. G., Sviridov D. V. Nanoengineered thin-film TiO₂/h-MoO₃ photocatalysts capable to accumulate photoinduced charge. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 2016, vol. 327, pp. 44–50. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2016.04.018>
14. Sviridova T. V., Stepanova L. I., Sviridov D. V. Electrochemical synthesis of Ni–MoO₃ composite films: redox-mediated mechanism of electrochemical growth of metal–matrix composite. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 2012, vol. 16, no. 12, pp. 3799–3803. <https://doi.org/10.1007/s10008-012-1816-2>
15. Sviridova T. V., Logvinovich A. S., Sviridov D. V. Electrochemical growing of Ni–MoO₃ nanocomposite coatings via redox mechanism. *Surface and Coatings Technology*, 2017, vol. 319, pp. 6–11. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.03.041>

Информация об авторах

Логвинович Александр Сергеевич – канд. хим. наук, доцент. Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220050, Минск, Республика Беларусь). E-mail: logvinovich2357@gmail.com.

Свиридова Татьяна Викторовна – д-р хим. наук, профессор. Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220050, Минск, Республика Беларусь). E-mail: sviridova@bsu.by.

Скорб Екатерина Владимировна – канд. хим. наук, доцент, директор. Научно-образовательный центр информатики Университета ИТМО (ул. Ломоносова, 9, 191002, Санкт-Петербург, Российская Федерация). E-mail: skorb@itmo.ru.

Свиридов Дмитрий Вадимович – член-корреспондент, д-р хим. наук, профессор, декан. Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220050, Минск, Республика Беларусь). E-mail: sviridov@bsu.by.

Агабеков Владимир Енокович – академик, д-р хим. наук, профессор, почетный директор. Институт химии новых материалов НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 36, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: agabekov@ichnm.by.

Information about the authors

Logvinovich Alexander S. – Ph. D. (Chemistry), Associate Professor. Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220050, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: logvinovich2357@gmail.com.

Sviridova Tatiana V. – D. Sc. (Chemistry), Professor. Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220050, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sviridova@bsu.by.

Skorb Ekaterina V. – Ph. D. (Chemistry), Associate Professor, Director. Infochemistry Scientific Center of the ITMO University (9, Lomonosov Str., St. Petersburg, 191002, Russian Federation). E-mail: skorb@itmo.ru.

Sviridov Dmitry V. – Corresponding Member, D. Sc. (Chemistry), Professor, Dean of the Faculty. Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220050, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sviridov@bsu.by.

Agabekov Vladimir E. – Academician, D. Sc. (Chemistry), Professor, Honorary Director. Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Sciences of Belarus (36, F. Skorina Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: agabekov@ichnm.by.

БИОЛОГИЯ**BIOLOGY**

УДК 57+616+316

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-3-294-300>

Поступило в редакцию 01.04.2022

Received 01.04.2022

**И. Б. Моссе¹, Л. В. Кухтинская¹, Н. Г. Седляр¹, Т. В. Докукина²,
академик А. В. Кильчевский¹**

¹*Институт генетики и цитологии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь*

²*Республиканский научно-практический центр психического здоровья Министерства здравоохранения Республики Беларусь, Минск, Республика Беларусь*

**РОЛЬ ПОЛИМОРФНЫХ ВАРИАНТОВ ГЕНОВ
ДОФАМИНЕРГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ В ФОРМИРОВАНИИ
ПСИХОЭМОЦИОНАЛЬНОГО СТАТУСА ЧЕЛОВЕКА**

Аннотация. Гены нейромедиаторных систем мозга играют значительную роль в формировании психологических свойств человека. Дофаминергическая система является одной из ведущих систем, оказывающих влияние на проявление индивидуальных психологических особенностей и развитие тревожно-депрессивных расстройств. Нами проанализирована ассоциация полиморфных вариантов генов дофаминергической системы с психоэмоциональным статусом человека. В исследовании приняли участие 1454 представителя белорусской популяции. В качестве групп предположительно более стрессоустойчивых исследованы генотипы 167 сотрудников спецподразделений Министерства внутренних дел Республики Беларусь и 235 высококвалифицированных спортсменов. Противоположную группу составили 534 пациента РНПЦ психического здоровья Министерства здравоохранения Республики Беларусь с личностными расстройствами и девиантным поведением. В группу популяционного контроля вошли 518 добровольцев без известных патологий. В результате проведенного психологического тестирования определены методом квартилей группы с низкой и высокой эмоциональной стабильностью. Молекулярно-генетическое тестирование групп по 11 полиморфным вариантам 5 генов дофаминергической системы позволило выявить информативные генетические маркеры психоэмоционального статуса человека. Наиболее значимыми оказались полиморфизмы rs4680 и rs165599 гена катехол-О-метилтрансферазы *COMT*, rs1611115 гена фермента метаболизма дофамина допамин-β-гидроксилазы *DBH* и rs6275 гена дофаминовых рецепторов *DRD2*. Полученные результаты могут быть использованы для превентивной диагностики нарушений психоэмоциональной сферы, а также для разработки программ коррекции пограничных состояний, девиантного и делинквентного поведения, а также психических заболеваний.

Ключевые слова: психоэмоциональный статус, дофаминергическая система, молекулярно-генетический анализ

Для цитирования. Роль полиморфных вариантов генов дофаминергической системы в формировании психоэмоционального статуса человека / И. Б. Моссе [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2022. – Т. 66, № 3. – С. 294–300. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-3-294-300>

**Irma B. Mosse¹, Lilia V. Kukhtinskaya¹, Nikita G. Sedliar¹,
Tatyana V. Dokukina², Academician Alexander V. Kilchevsky¹**

¹*Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

²*Republican Scientific and Practical Center for Mental Health of the Ministry of Health of the Republic of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

**ROLE OF THE GENE POLYMORPHIC VARIANTS OF THE DOPAMINERGIC SYSTEM
IN THE FORMATION OF THE HUMAN PSYCHO-EMOTIONAL STATUS**

Abstract. The genes of the neurotransmitter systems of the brain play a significant role in the formation of the psychological properties of a person. The dopaminergic system is one of the leading systems influencing the manifestation of individual psychological characteristics and the development of anxiety and depressive disorders. The association of polymorphic variants of the dopaminergic system genes with the psycho-emotional status of a person was analyzed using the molecular genetic analysis. The study involved 1454 representatives of the Belarusian population. The genotypes of 167 employees of the special forces of the Ministry of Internal Affairs of the Republic of Belarus and 235 highly skilled athletes were studied as the groups

that were supposedly more stress-resistant. The opposite group consisted of 534 patients of the Republican Scientific and Practical Center for Mental Health with personality disorders and deviant behavior. The population control group included 518 volunteers representing the population of Belarus without known pathologies. As a result of the psychological testing, the groups with low and high emotional stability were identified by the quartile method. Genetic testing of groups with 11 polymorphic variants of 5 genes of the dopaminergic system made it possible to identify informative genetic markers of a person's psycho-emotional status. The most significant polymorphisms were rs4680 and rs165599 of the *COMT* catechol-O-methyltransferase gene, rs1611115 of the dopamine-metabolizing enzyme dopamine- β -hydroxylase gene *DBH*, and rs6275 of the type 2 dopamine receptor gene *DRD2*. The results obtained can be used for preventive diagnostics of disorders in the psycho-emotional sphere, as well as for the development of programs for correction of borderline states, deviant and delinquent behavior, as well as mental illness.

Keywords: psychoemotional status, dopaminergic system, molecular genetic analysis

For citation. Mosse I. B., Kukhtinskaya L. V., Sedliar N. G., Dokukina T. V., Kilchevsky A. V. Role of the gene polymorphic variants of the dopaminergic system in the formation of the human psycho-emotional status. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2022, vol. 66, no. 3, pp. 294–300 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-3-294-300>

Введение. Согласно современным научным исследованиям, гены нейромедиаторных систем мозга играют значительную роль в формировании психологических свойств человека, поэтому раннее выявление генов-кандидатов психоэмоциональных особенностей личности является прогностически важным и значимым. Стратегия поиска таких генов основывается на исследовании полиморфных вариантов генов разных нейромедиаторных систем.

Дофаминэргическая система является одной из ведущих систем, оказывающих влияние на проявление индивидуальных особенностей психоэмоциональной сферы и развитие тревожно-депрессивных расстройств [1; 2]. Дофамин – нейромедиатор, регулирующий ряд высших мозговых функций (эмоции, обучение, память, внимание и др.) [2]. Субстратом для синтеза дофамина служит L-тирозин, который в присутствии тирозингидроксилазы в аксоплазме нейрона превращается в 3,4-дигидроксифенилаланин (ДОФА), а затем в дофамин [3]. Выделяемый в синаптическую щель дофамин участвует в передаче нервного импульса. Деградация дофамина в синаптической щели, как и других катехоламинов, протекает при участии ферментов катехол-O-метилтрансферазы (COMT).

Цель исследования заключалась в изучении генетических детерминант психоэмоционального статуса личности на примере полиморфных вариантов генов дофаминэргической системы. Нами были отобраны для исследования 11 полиморфных вариантов 5 генов дофаминэргической системы: катехол-O-метилтрансферазы *COMT* (rs4680, rs165599), фермента метаболизма дофамина допамин- β -гидроксилазы *DBH* (rs1108580, rs1611115), дофаминовых рецепторов тип 2 *DRD2* (rs6277, rs6275, rs1800497), дофаминовых рецепторов тип 4 *DRD4* (rs1800955), регуляторной субъединицы 1B белка фосфатазы 1 (дофамин и цАМФА-регулируемого нейронального фосфопротеина) *PPP1R1B* (rs907094, rs879606, rs3764352), ассоциированных с психоэмоциональным статусом человека.

Материалы и методы исследования. Общий объем исследуемой выборки составил 1454 человека. В качестве групп предположительно более стрессоустойчивых исследованы генотипы 167 сотрудников спецподразделений Министерства внутренних дел Республики Беларусь и 235 высококвалифицированных спортсменов, т. е. людей, испытывающих постоянные физические и психические нагрузки. Противоположную группу составили 534 пациента РНПЦ психического здоровья Министерства здравоохранения Республики Беларусь с личностными расстройствами и девиантным поведением. В группу популяционного контроля вошли 518 добровольцев, представляющих население Беларуси, без известных патологий.

От каждого участника было получено информированное согласие на включение в исследование. Дизайн исследования утвержден Биоэтическим комитетом РНПЦ психического здоровья Министерства здравоохранения Республики Беларусь.

Генотипирование проведено по 11 полиморфным вариантам 5 генов дофаминэргической системы с последующей оценкой связи полученных результатов с компонентами психоэмоциональной устойчивости.

В качестве биологического материала была использована тотальная геномная ДНК, выделенная из лейкоцитов периферической венозной крови с применением набора реагентов «ДНК-Экс-

тран» («Синтол», Россия), а также из буккального эпителия, взятого на ватный тампон-зонд, при помощи коммерческого набора реагентов «Нуклеосорб» модификация А (ОДО «Праймтех», Республика Беларусь). Для контроля количественных характеристик полученной ДНК использовали флуориметрический анализ на базе прибора GloMax Explorer (Promega, США) и набора реагентов QuantiFluor® ONE dsDNA System (Promega, США).

Для установления генотипов по целевым локусам применяли метод полимеразной цепной реакции (ПЦР) в реальном времени с использованием прибора CFX96 Touch (BioRad, США) и с последующим анализом полученных результатов с помощью программного обеспечения CFX96 Manager 3.1. Использовались готовые коммерческие TaqMan MGB зонды (Applied Biosystems, США).

Статистическую обработку данных проводили с использованием пакета программ Microsoft Excel 2016, онлайн-калькуляторов SNPstats (<https://www.snpstats.net>) и Medstatistic (<https://medstatistic.ru>). Наблюдаемые частоты генотипов проверяли на соответствие равновесию Харди–Вайнберга. Оценку влияния полиморфных вариантов на риск развития заболевания проводили с помощью отношения шансов (OR). Результаты анализа считали статистически значимыми при уровне $p < 0,05$.

Результаты и их обсуждение. Для оценки психоэмоционального состояния испытуемых были применены скрининговый клинический тест «Госпитальная шкала тревоги и депрессии (HADS)» [4] и валидизированная русскоязычная версия международного опросника «Шкала воспринимаемого стресса (Шкала стресса Коэна)» («The Perceived Stress Scale») в двух вариантах, включающих 10 и 14 вопросов (PSS-10 и PSS-14 соответственно). HADS-тест использовали с целью определения склонности исследуемых индивидов к ощущению тревожности и/или подавленного (депрессивного) состояния. Шкала составлена из 14 пунктов и включает 2 подшкалы: «тревога» и «депрессия». Баллы по каждой подшкале подсчитывались отдельно. Максимально возможное количество баллов по HADS-тесту составляет 42, минимальное – 0.

Тест PSS определяет уровень воспринимаемого стресса, т. е. субъективного восприятия напряженности ситуации. Ответы на вопросы оценивались по 5-балльной шкале в диапазоне от 1 до 5 за ответ. Более высокие суммарные баллы, соответственно, указывают на более высокий уровень воспринимаемого стресса [5; 6]. Для оценки способности противостоять нервно-психическим перегрузкам нами использовалась версия, включающая 10 вопросов (PSS-10). Суммарно тестирование проводилось по 28 вопросам, максимально возможное количество баллов, которые можно набрать по обоим тестам, составляет 98, минимальное – 0.

В зависимости от количества набранных баллов по каждому из тестов в отдельности и, соответственно, степени выраженности тестируемого признака, испытуемые были разделены на группы с использованием метода квартилей: 1-я группа – LSC (Low Score Category), включающая 25 % лиц, набравших минимальное количество баллов по каждому из тестов и попадающих в нижний квартиль распределения (1-й квантиль); 2-я группа – HSC (High Score Category), к которой отнесли 25 % респондентов, набравших максимальное количество баллов, т. е. верхний квартиль распределения, соответственно, имеющих нарушения психоэмоциональной сферы, вплоть до субклинического и клинического проявления. Согласно методу квартилей, группа лиц, набравших среднее количество баллов и составляющих 50 % респондентов (2 и 3 квартиль), исключались из дальнейшего анализа.

Для групп 1 и 2 исследовано распределение частот полиморфных вариантов генов дофаминэргической системы – кандидатов для выявления генетических маркеров психоэмоционального статуса человека (таблица).

На основании результатов генетического тестирования проведен анализ ассоциации отобранных полиморфных вариантов генов с психоэмоциональными особенностями исследуемых лиц: с вероятностью развития депрессивных и тревожных состояний (тест HADS, подшкалы «депрессия» и «тревога»), восприятием стресса и устойчивостью к нервно-психическим перегрузкам (опросник PSS-10) и психоэмоциональной устойчивостью в целом (комбинация тестов PSS-14 и HADS).

Распределение аллельных вариантов генов дофаминергической системы, достоверно различающихся в группах с разным количеством баллов по тестам психологического тестирования
Distribution of the allelic variants of the dopaminergic system genes different in the groups with different scores on psychological tests

Полиморфный вариант Polymorphic variant	Тест Test	Аллельный вариант Allelic variant	Частота генотипов, % Genotype frequency, %		χ^2	p-value	OR (95 % CI)
			Группа 1 (LSC) Group 1 (LSC)	Группа 2 (HSC) Group 2 (HSC)			
COMT rs4680	HADS-D	G/G	22,8	31,4	7,40	0,024	1,36 (0,89–2,07)
		G/A	52,0	42,9			0,60 (0,41–0,87)
		A/A	25,2	25,7			0,74 (0,48–1,13)
	HADS-T	G/G	22,9	32,3	19,39	<0,001	1,03 (0,67–1,59)
		G/A	56,4	39,3			0,49 (0,34–0,71)
		A/A	20,7	28,4			0,97 (0,63–1,49)
	PSS-10	G/G	22,8	30,9	5,63	0,059*	1,38 (0,89–2,14)
		G/A	51,8	44,3			0,63 (0,43–0,93)
		A/A	25,4	24,8			0,72 (0,47–1,12)
	PSS-14+ HADS	G/G	21,2	31,5	10,21	0,006	1,44 (0,93–2,25)
		G/A	54,3	43,3			0,54 (0,37–0,79)
		A/A	24,4	25,2			0,69 (0,45–1,08)
COMT rs165599	HADS-T	A/A	37,1	46,1	6,08	0,048	1,27 (0,78–2,07)
		A/G	50,1	41,4			0,66 (0,48–0,92)
		G/G	12,8	12,5			0,79 (0,48–1,28)
DRD2 rs6275	HADS-D	C/C	42,0	42,3	5,11	0,077*	0,71 (0,45–1,10)
		C/T	44,4	38,1			0,85 (0,61–1,19)
		T/T	13,6	19,5			1,42 (0,91–2,23)
	HADS-T	C/C	40,1	43,7	0,18	0,046	0,68 (0,43–1,06)
		C/T	45,8	37,1			0,74 (0,53–1,04)
		T/T	14,1	19,2			1,25 (0,80–1,95)
DBH rs1611115	PSS-10	C/C	55,3	63,9	7,11	0,028	0,85 (0,41–1,79)
		C/T	40,5	30,4			0,65 (0,47–0,91)
		T/T	4,2	5,7			1,17 (0,56–2,46)

Примечание: группа 1 (LSC) – 25 % лиц, попадающих в нижний квартиль распределения; группа 2 (HSC) – 25 % лиц, попадающих в верхний квартиль распределения; * – различия на уровне тенденции; HADS-D – подшкала «депрессия»; HADS-T – подшкала «тревога».

Note: group 1 (LSC) – 25 % of persons falling into the lower quartile of distribution; group 2 (HSC) – 25 % of persons falling into the upper quartile of distribution; * – differences at the trend level; HADS-D – “depression subscale”; HADS-T – “anxiety” subscale.

Наиболее значимые результаты получены для генов *COMT* (rs4680 и rs165599), *DRD2* (rs6275) и *DBH* (rs1611115).

Ген *COMT* кодирует фермент катехол-О-метилтрансферазу и считается ключевым модулятором обмена нейропептидов и функционирования мезокортикальной дофаминергической системы [2]. Ген *COMT* расположен на участке 22q11.1-q11.2. Предполагают, что регион 22q11.21 детерминирует шизофрению и биполярное аффективное расстройство [6]. Наиболее известен полиморфный вариант rs4680 (G472A), представляющий собой однонуклеотидную замену в экзоне 4 гена с замещением аминокислоты *Val* на *Met* и оказывающий влияние на метаболическую активность фермента [7]. В случае носительства варианта *Val* (аллель *G*) дофаминергическая активность катехол-О-метилтрансферазы возрастает на 40 % [7; 8]. По нашим данным полиморфный вариант rs4680 гена *COMT* оказался наиболее значимым при оценке связи генов дофаминергической системы с компонентами психоэмоционального статуса. Из данных, приведенных в таблице, видно, что генотип *G/G* гена *COMT* (rs4680) чаще встречается в группе лиц с высоким числом баллов, предположительно отличающихся лабильным психоэмоциональным статусом. Согласно полученным нами результатам, носительство аллеля *A* полиморфного варианта rs4680

детерминирует стабильный психоэмоциональный статус. Соответственно, аллель *A* и генотипы *A/A* и *A/G* связаны с высокой психологической устойчивостью и низкой степенью проявления депрессивной симптоматики или ее отсутствием.

При сравнении частот аллельных вариантов гена *COMT* rs165599 в группах лиц с низким (1 группа) и высоким (2 группа) количеством баллов нами обнаружены достоверные различия при $p < 0,05$ в частотах генотипа *A/A* и *A/G*. Во 2-й группе генотип *A/A* встречается чаще, чем в 1-й группе при рассмотрении всех изучаемых нами компонентов психоэмоционального статуса, но достоверная связь установлена только с симптомом тревоги ($p = 0,048$). Полиморфный вариант rs165599 гена *COMT* расположен в районе 3'-нетранслируемой области рядом с экзоном 1 изоформы *MB-COMT* [9] и оказывает влияние на транскрипцию, стабильность мРНК и эффективность трансляции [3]. При носительстве аллеля *G* экспрессия гена *COMT* снижается на 12–43 % в сравнении с аллелем *A* [10]. Этим, очевидно, и объясняется ассоциация аллеля *A* с тревожным компонентом психоэмоционального статуса.

При анализе результатов генотипирования rs6275 гена *DRD2* в группах, разделенных по подшкале «депрессия» HADS-теста, наблюдались различия на уровне тенденции ($p = 0,077$). Во 2-й группе частота встречаемости генотипа *T/T* составила 19,5 % в сравнении с 13,6 % в первой группе. Ген *DRD2*, кодирующий наиболее распространенный рецептор дофамина, расположен в локусе 11q22.3-23.1. Показано, что стимуляция рецепторов дофамина лежит в основе проявления страха и тревоги [11].

По гену *DBH* (rs1611115) также обнаружены достоверные различия между группами. Генотип *C/C* гена *DBH* чаще встречается у лиц во 2-й группе (HSC), чем в 1-й группе (LSC) (63,9 и 55,3 % соответственно; $p = 0,029$). Частота гетерозиготного генотипа *C/T* преобладает в группе с низким количеством баллов (40,5 %) в сравнении с группой с высоким числом баллов (30,4 %). Ген *DBH* локализован в регионе 9q34 и играет ключевую роль в биосинтезе норадреналина [12]. Полиморфные варианты *DBH* связаны с рядом нервно-психических расстройств (униполярной и биполярной депрессией, шизофренией) [13; 14]. Наиболее известен вариант rs1611115 гена, который представляет собой замену $C > T$ в положении 1021 и оказывает влияние на активность фермента, а через него на эффективность рабочей памяти, эмоциональную устойчивость и принятие решений [15]. Аллель *T* кодирует низкоактивный фермент [13]. Лица с генотипами *T/T*, *C/T* и *C/C* имеют соответственно очень низкий, низкий и нормальный уровень активности *DBH* [13; 15].

Заключение. Исследованы генетические детерминанты психоэмоционального статуса личности на примере 11 полиморфных вариантов 5 генов дофаминэргической системы: катехол-О-метилтрансферазы *COMT* (rs4680, rs165599), фермента метаболизма дофамина допамин-β-гидроксилазы *DBH* (rs1108580, rs1611115), дофаминовых рецепторов тип 2 *DRD2* (rs6277, rs6275, rs1800497), дофаминовых рецепторов тип 4 *DRD4* (rs1800955), регуляторной субъединицы 1В белка фосфатазы 1 (дофамин и цАМФА-регулируемого нейронального фосфопротеина) *PPP1R1B* (rs907094, rs879606, rs3764352), ассоциированных с психоэмоциональным статусом человека.

В исследовании приняли участие 1454 представителя белорусской популяции. В результате проведенного психологического тестирования определены методом квартилей группы с низкой и высокой эмоциональной стабильностью. Молекулярно-генетическое тестирование групп позволило выявить информативные генетические маркеры психоэмоционального статуса человека. Наиболее значимыми оказались полиморфизмы rs4680 и rs165599 гена катехол-О-метилтрансферазы *COMT*, rs1611115 гена фермента метаболизма дофамина допамин-β-гидроксилазы *DBH* и rs6275 гена дофаминовых рецепторов *DRD2*.

Сравнение результатов генетического и психологического тестирования, полученных в ходе исследования, свидетельствует о значительной роли ряда генов дофаминэргической системы в формировании психоэмоциональной устойчивости человека. Полученные данные могут быть использованы для превентивной диагностики нарушений психоэмоциональной сферы, а также для разработки программ коррекции пограничных состояний, девиантного поведения, а также психических заболеваний.

Благодарности. Работа выполнена в рамках реализации мероприятия «Разработка методики определения статуса генетических локусов и прижизненной модификации участков ДНК, влияющих на психоэмоциональный статус человека» НТП Союзного государства «Разработка инновационных геногеографических и геномных технологий идентификации личности и индивидуальных особенностей человека на основе изучения генофондов регионов Союзного государства» («ДНК-идентификация»).

Acknowledgements. The results obtained in the project “Development of a methodology for determining the status of genetic loci and lifetime modification of DNA sites affecting the psychoemotional status of a person” of the research-and-technological program of the Union State of Russia and Belarus “DNA Identification”.

Список использованных источников

1. Калимуллина, Л. Б. Анализ ассоциаций по сочетаниям генотипов полиморфных ДНК-локусов (tag 1a и NcoI) Drd2, 256A/G гена Slc6a3 и объемных характеристик миндалевидного комплекса мозга с повышенной тревожностью / Л. Б. Калимуллина, А. В. Ахмадеев, А. Я. Ханнанова // Успехи современного естествознания. – 2011. – № 11. – С. 9–11.
2. Benjamin, J. *Molecular Genetics and the Human Personality* / J. Benjamin, R. P. Ebstein, R. H. Belmaker. – American Psychiatric Pub., 2008. – 452 p.
3. Dopamine multilocus genetic profiles predict sex differences in reactivity of the human reward system / E. K. Diekhof [et al.] // *Brain Struct. Funct.* – 2021. – Vol. 226, N 4. – P. 1099–1114. <https://doi.org/10.1007/s00429-021-02227-6>
4. A validation study of the Hospital Anxiety and Depression Scale (HADS) in different groups of Dutch subjects / P. Spinhoven [et al.] // *Psychol. Med.* – 1997. – Vol. 27, N 2. – P. 363–370. <https://doi.org/10.1017/s0033291796004382>
5. Cohen, S. A Global Measure of Perceived Stress / S. Cohen, T. Kamarck, R. Mermelstein // *J. Health Soc. Behav.* – 1983. – Vol. 24, N 4. – P. 385–396. <https://doi.org/10.2307/2136404>
6. Валидизация русскоязычной версии опросника «Шкала воспринимаемого стресса-10» / В. А. Абабков [и др.] // Вестн. С.-Петерб. ун-та. Сер. 16: Психология. Педагогика. – 2016. – № 2. – С. 6–15. <https://doi.org/10.21638/11701/spbu16.2016.202>
7. Look beyond Catechol-O-Methyltransferase genotype for catecholamines derangement in migraine: the BioBIM rs4818 and rs4680 polymorphisms study / M. L. De Marchis [et al.] // *J. Headache Pain.* – 2015. – Vol. 16, N 1. – P. 37–45. <https://doi.org/10.1186/s10194-015-0520-x>
8. Dean, B. Associations between catechol-O-methyltransferase (COMT) genotypes at rs4818 and rs4680 and gene expression in human dorsolateral prefrontal cortex / B. Dean, G. M. Parkin, A. S. Gibbons // *Exp. Brain Res.* – 2020. – Vol. 238, N 2. – P. 477–486. <https://doi.org/10.1007/s00221-020-05730-0>
9. Genomic organization of the human catechol O-methyltransferase gene and its expression from two distinct promoters / J. Tenhunen [et al.] // *Eur. J. Biochem.* – 1994. – Vol. 223, N 3. – P. 1049–1059. <https://doi.org/10.1111/j.1432-1033.1994.tb19083.x>
10. A haplotype implicated in schizophrenia susceptibility is associated with reduced COMT expression in human brain / N. J. Bray [et al.] // *Am. J. Hum. Genet.* – 2003. – Vol. 73, N 1. – P. 152–161. <https://doi.org/10.1086/376578>
11. Effect of COMT Val^{108/158} Met genotype on frontal lobe function and risk for schizophrenia / M. F. Egan [et al.] // *Proc. Natl. Acad. Sci.* – 2001. – Vol. 98, N 12. – P. 6917–6922. <https://doi.org/10.1073/pnas.111134598>
12. Regulatory Polymorphisms in Human DBH Affect Peripheral Gene Expression and Sympathetic Activity / E. S. Barrie [et al.] // *Circ. Res.* – 2014. – Vol. 115, N 12. – P. 1017–1025. <https://doi.org/10.1161/circresaha.116.304398>
13. Association of regulatory variants of dopamine β-hydroxylase with cognition and tardive dyskinesia in schizophrenia subjects / T. J. Panchaichira [et al.] // *J. Psychopharmacol. Oxf. Engl.* – 2020. – Vol. 34, N 3. – P. 358–369. <https://doi.org/10.1177/0269881119895539>
14. The dopamine β-hydroxylase –1021C/T polymorphism is associated with the risk of Alzheimer’s disease in the Epistasis Project / O. Combarros [et al.] // *BMC Med. Genet.* – 2010. – Vol. 11, N 1. – P. 162–172. <https://doi.org/10.1186/1471-2350-11-162>
15. Effects of cultural intensity and density regime treatment on post-thinning loblolly pine individual tree DBH increment in the lower coastal plain of the southeastern United States / J. T. Perren [et al.] // *Proc. 18th Bienn. South. Silv. Res. Conf. E-Gen Tech Rep SRS-212 Asheville NC US Dep. Agric. For. Serv. South. Res. Stn. 614 P.* – 2016. – Vol. 212. – P. 288–292.

References

1. Kalimullina L. B., Akhmadeev A. V., Khannanova A. Ya. Analysis of associations on combinations of genotypes of polymorphic DNA-locus (tag 1a and NcoI) Drd2, 256A/G OF THE Slc6a3 gene and volume characteristics of the almondal complex of the brain with increased anxiety. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* [Advances in Current Natural Sciences], 2011, no. 11, pp. 9–11 (in Russian).
2. Benjamin J., Ebstein R. P., Belmaker R. H. *Molecular Genetics and the Human Personality*. American Psychiatric Pub, 2008. 452 p.
3. Diekhof E. K., Richter A., Brodmann K., Gruber O. Dopamine multilocus genetic profiles predict sex differences in reactivity of the human reward system. *Brain Structure and Function*, 2021, vol. 226, no. 4, pp. 1099–1114. <https://doi.org/10.1007/s00429-021-02227-6>
4. Spinhoven P., Ormel J., Sloekers P. P. A., Kempen G. I. J. M., Speckens A. E. M., Van Hemert A. M. A validation study of the Hospital Anxiety and Depression Scale (HADS) in different groups of Dutch subjects. *Psychological Medicine*, 1997, vol. 27, no. 2, pp. 363–370. <https://doi.org/10.1017/s0033291796004382>

5. Cohen S., Kamarck T., Mermelstein R. A Global Measure of Perceived Stress. *Journal of Health and Social Behavior*, 1983, vol. 24, no. 4, pp. 385–396. <https://doi.org/10.2307/2136404>
6. Ababkov V. A., Barisnikov K., Vorontzova-Wenger O. V., Gorbunov I. A., Kapranova S. V., Pologaeva E. A., Stuklov K. A. Validation of the Russian version of the questionnaire “Scale of perceived stress–10”. *Vestnik of Saint-Petersburg University. Series 16. Psychology. Education*, 2016, no. 2, pp. 6–15 (in Russian). <https://doi.org/10.21638/11701/spbu16.2016.202>
7. De Marchis M. L., Barbanti P., Palmirotta R., Egeo G., Aurilia C., Fofi L., Piroso S., Ialongo C., Della-Morte D., D’Andrea G., Ferroni P., Guadagni F. Look beyond Catechol-O-Methyltransferase genotype for catecholamines derangement in migraine: the BioBIM rs4818 and rs4680 polymorphisms study. *Journal of Headache and Pain*, 2015, vol. 16, no. 1, pp. 37–45. <https://doi.org/10.1186/s10194-015-0520-x>
8. Dean B., Parkin G. M., Gibbons A. S. Associations between catechol-O-methyltransferase (COMT) genotypes at rs4818 and rs4680 and gene expression in human dorsolateral prefrontal cortex. *Experimental Brain Research*, 2020, vol. 238, no. 2, pp. 477–486. <https://doi.org/10.1007/s00221-020-05730-0>
9. Tenhunen J., Salminen M., Lundstrom K., Kiviluoto T., Savolainen R., Ulmanen I. Genomic organization of the human catechol O-methyltransferase gene and its expression from two distinct promoters. *European Journal of Biochemistry*, 1994, vol. 223, no. 3, pp. 1049–1059. <https://doi.org/10.1111/j.1432-1033.1994.tb19083.x>
10. Bray N. J., Buckland P. R., Williams N. M., Williams H. J., Norton N., Owen M. J., O’Donovan M. C. A Haplotype implicated in schizophrenia susceptibility is associated with reduced COMT expression in human brain. *American Journal of Human Genetics*, 2003, vol. 73, no. 1, pp. 152–161. <https://doi.org/10.1086/376578>
11. Egan M. F., Goldberg T. E., Kolachana B. S., Callicott J. H., Mazzanti C. M., Straub R. E., Goldman D., Weinberger D. R. Effect of COMT Val^{108/158} Met genotype on frontal lobe function and risk for schizophrenia. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2001, vol. 98, no. 12, pp. 6917–6922. <https://doi.org/10.1073/pnas.111134598>
12. Barrie E. S., Weinschenker D., Verma A., Pendergrass S. A., Lange L. A., Ritchie M. D., Wilson J. G., Kuivaniemi H., Tromp G., Carey D. J., Gerhard G. S., Brilliant M. H., Hebring S. J., Cubells J. F., Pinsonneault J. K., Norman G. J., Sadee W. Regulatory Polymorphisms in Human DBH Affect Peripheral Gene Expression and Sympathetic Activity. *Circulation Research*, 2014, vol. 115, no. 12, pp. 1017–1025. <https://doi.org/10.1161/circresaha.116.304398>
13. Punaichira T. J., Mukhopadhyay A., Kukshal P., Bhatia T., Deshpande S. N., Thelma B. K. Association of regulatory variants of dopamine β -hydroxylase with cognition and tardive dyskinesia in schizophrenia subjects. *Journal of Psychopharmacology*, 2020, vol. 34, no. 3, pp. 358–369. <https://doi.org/10.1177/0269881119895539>
14. Combarros O., Warden D. R., Hammond N., Cortina-Borja M., Belbin O., Lehmann M. G., Wilcock G. K., Brown K., Kehoe P. G., Barber R., Coto E., Alvarez V., Deloukas P., Gwilliam R., Heun R., Kölsch H., Mateo I., Oulhaj A., Arias-Vásquez A., Schuur M., Aulchenko Yu. S., Ikram M. A., Breteler M. M., van Duijn C. M., Morgan K., Smith A. D., Lehmann D. J. The dopamine β -hydroxylase -1021C/T polymorphism is associated with the risk of Alzheimer’s disease in the Epistasis Project. *BMC Medical Genetics*, 2010, vol. 11, no. 1, pp. 162–172. <https://doi.org/10.1186/1471-2350-11-162>
15. Perren J. T., Effects of cultural intensity and density regime treatment on post-thinning loblolly pine individual tree DBH increment in the lower coastal plain of the southeastern United States. *Proceedings of the 18th Biennial Southern Silvicultural Research Conference. E-Gen Tech Rep SRS-212 Asheville NC US Dep. Agric. For. Serv. South. Res. Stn. 614 P*, 2016, vol. 212, pp. 288–292.

Информация об авторах

Моссе Ирма Борисовна – д-р биол. наук, профессор, гл. науч. сотрудник. Институт генетики и цитологии НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: i.mosse@igc.by.

Кухтинская Лилия Валерьевна – науч. сотрудник. Институт генетики и цитологии НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: lilya.k.77@mail.ru.

Седляр Никита Геннадьевич – науч. сотрудник. Институт генетики и цитологии НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: n.osennij@gmail.com.

Докукина Татьяна Васильевна – д-р мед. наук, доцент, заместитель директора. РНПЦ психического здоровья Министерства здравоохранения Республики Беларусь (Долгиновский тракт, 152, 220053, Минск, Республика Беларусь). E-mail: 4polak0208@mail.ru.

Кильчевский Александр Владимирович – академик, д-р биол. наук, профессор, заведующий лабораторией. Институт генетики и цитологии НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: kilchev@presidium.by.

Information about the authors

Mosse Irma B. – D. Sc. (Biology), Professor, Chief Researcher. Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: i.mosse@igc.by.

Kukhtinskaya Lilia V. – Researcher. Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lilya.k.77@mail.ru.

Siadliar Nikita G. – Researcher. Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: n.osennij@gmail.com.

Dokukina Tatyana V. – D. Sc. (Medicine), Associate Professor, Deputy director. Republican Scientific and Practical Center for Mental Health of the Ministry of Health of the Republic of Belarus (152, Dolginovskij Trakt, 220053, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: 4polak0208@mail.ru.

Kilchevsky Alexander V. – Academician, D. Sc. (Biology), Professor, Head of the Laboratory. Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kilchev@presidium.by.

ISSN 1561-8323 (Print)
ISSN 2524-2431 (Online)

УДК 636.1.082:575(571.56)
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-3-301-309>

Поступило в редакцию 31.03.2022
Received 31.03.2022

В. Н. Кипень, Е. В. Снытков, М. Е. Михайлова, член-корреспондент Р. И. Шейко

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

ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ ПОРОД ДОМАШНИХ СВИНЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАСШИРЕННОГО БИОИНФОРМАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА SNP

Аннотация. С использованием методов биоинформатики проведен анализ данных по секвенированию геномов особей вида *Sus scrofa domestica*, которые расположены в базе Sequence Read Archive (NCBI-SRA). Определены *in silico* генотипы для пяти пород домашних свиней – дюрок, ландрас, пьетрен, крупная белая и йоркшир с помощью алгоритма, разработанного на языке программирования Python. На основании двухстадийного биоинформатического анализа определен широкий перечень SNP с высоким потенциалом для дифференциации. Полученные результаты будут использованы при создании экспресс-методов для определения чистопородности свиней данных пород. Расширенный биоинформатический анализ, который включал в себя определение генотипа по 7451 SNP для 248 геномов *Sus scrofa domestica*, позволил выявить суммарно 393 SNP для всех пород, для которых имеется существенная разница в частоте альтернативных аллелей у пород свиней дюрок, ландрас, пьетрен, крупная белая и йоркшир. Обозначены кластеры в пределах хромосом, в которых плотность SNP с высоким дифференцирующим потенциалом наиболее высока. Для свиней породы дюрок нами выявлены 184 SNP, имеющие дифференцирующий потенциал, для 24 из которых показан высокий дифференцирующий потенциал, для свиней породы ландрас – 52 SNP и 7, для свиней породы пьетрен – 39 и 9, для свиней породы крупная белая – 104 и 22, для свиней породы йоркшир – 14 и 5 соответственно.

Ключевые слова: *Sus scrofa domestica*, дифференциация, однонуклеотидный полиморфизм, породоспецифичность, дюрок, ландрас, пьетрен, крупная белая, йоркшир, ROC-анализ, *in silico*

Для цитирования. Дифференциация пород домашних свиней с использованием расширенного биоинформатического анализа SNP / В. Н. Кипень [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2022. – Т. 66, № 3. – С. 301–309. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-3-301-309>

Viachaslau N. Kipen, Evgenij V. Snytkov, Mariya E. Mikhailova, Corresponding Member Ruslan I. Sheyko

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

BREED DIFFERENTIATION OF DOMESTIC PIGS USING SNP – EXTENDED BIOINFORMATICAL ANALYSIS

Abstract. Using the methods of bioinformatics, the analysis of data on sequencing of the genomes of individuals of the species *Sus scrofa domestica*, which are located in the Sequence Read Archive (NCBI-SRA) database, was carried out. Genotypes were determined *in silico* for five breeds of domestic pigs – Duroc, Landrace, Pietrain, Large White and Yorkshire using an algorithm developed in the Python programming language. Based on a two-stage bioinformatics analysis, a wide range of SNPs with a high potential for differentiation was identified. The results obtained will be used to create express methods for determining the purity of pigs of these breeds. Extended bioinformatics analysis, which included genotyping by 7451 SNPs for 248 *Sus scrofa domestica* genomes, revealed a total of 393 SNPs for all breeds for which there is a significant difference in the frequency of alternative alleles in Duroc, Landrace, Pietrain, Large White and Yorkshire pig breeds. Clusters within chromosomes are indicated, in which the density of SNPs with a high differentiating potential is the highest. For Duroc pigs, we identified 184 SNPs with differentiating potential, 24 of which showed a high differentiating potential, for Landrace pigs – 52 SNPs and 7, for Pietrain pigs – 39 and 9, for Large White pigs – 104 and 22, for Yorkshire pigs – 14 and 5, respectively.

Keywords: *Sus scrofa domestica*, differentiation, single nucleotide polymorphism, breed specificity, Duroc, Landrace, Pietrain, Large White, Yorkshire, ROC analysis, *in silico*

For citation. Kipen V. N., Snytkov E. V., Mikhailova M. E., Sheyko R. I. Breed differentiation of domestic pigs using SNP – extended bioinformatical analysis. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2022, vol. 66, no. 3, pp. 301–309 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-3-301-309>

Введение. Одна из приоритетных задач для селекции сельскохозяйственных животных – поддержание и совершенствование породных качеств. Это достигается за счет умелого подбора пар для скрещивания, поддержания линий в пределах породы и межлинейных кроссов. Как итог, сохранение генетического разнообразия дает селекционерам возможность совершенствовать

породу в заданном направлении вплоть до создания новых пород. Также чистопородное разведение заводских пород обеспечивает доступность высокоценного улучшающего племенного материала для товарного животноводства. Таким образом, определение чистопородности сельскохозяйственных животных имеет ключевое значение для всей отрасли животноводства.

SNP (Single Nucleotide Polymorphism) – эффективные и высокочувствительные маркеры для выявления генетической подразделенности пород и популяций. Данный тип генетических маркеров используется в качестве инструмента контроля происхождения животных, для выявления степени генетических различий между породами, типами, стадами и генеалогическими группами животных.

Определение чистопородности свиней (*Sus scrofa domestica*) также может быть проведено с использованием SNP. Технология мультиплексирования от компании Illumina[®] позволяет за один запуск прибора iScan[™] System охарактеризовать десятки тысяч SNP одновременно для сотен животных. О возможностях совмещения информации о PorcineSNP60 BeadChip с SRA-файлами, находящимися в открытом доступе, было подробно описано в наших предыдущих работах [1; 2].

Цель данной работы – с использованием современных биоинформатических и статистических методов провести расширенный анализ результатов секвенирования генома *Sus scrofa domestica* и определить SNP со значительным потенциалом для дифференциации пород домашних свиней дюрок, ландрас, пьетрен, крупная белая и йоркшир.

Материалы и методы исследования. *SNP и образцы.* Биоинформатический анализ включал два последовательных этапа. На первом этапе был сформирован максимально широкий перечень потенциально информативных SNP, в который вошли как ранее описанные SNP [2], так и фланкирующие их SNP из Axiom[®] Porcine Genotyping Array (Axiom_PigHDv1) от Affymetrix[®], а также SNP, для которых по состоянию на начало 2021 г. имелась доказанная ассоциация с QTL (Quantitative Trait Locus) и была представлена информация в Pig Quantitative Trait Locus Database (Pig QTLdb (<https://www.animalgenome.org>)). Общее количество SNP в анализе на первом этапе – 7451. Секвенированные нуклеотидные последовательности особей *Sus scrofa domestica*, которые анализировали на данном этапе, были представлены в формате *.fasta и имели статус «aligned» (выровненные) для каждой хромосомы. Общее количество образцов в анализе на первом этапе – 70 (дюрок – 16, ландрас – 22, пьетрен – 7, крупная белая – 25). На втором этапе был сформирован сокращенный перечень SNP, для которых с использованием ROC-анализа (Receiver Operating Characteristic) были выявлены статистически значимые ассоциации ($p < 0,001$). Общее количество SNP в анализе на втором этапе – 261. Секвенированные нуклеотидные последовательности особей *Sus scrofa domestica*, которые анализировали на данном этапе, были представлены в формате SRA. Общее количество образцов в анализе на втором этапе – 178 (дюрок – 69, ландрас – 24, пьетрен – 21, крупная белая – 45, йоркшир – 19). Таким образом, суммарно в исследовании были проанализированы данные 248 геномов особей *Sus scrofa domestica* (дюрок – 85, ландрас – 46, пьетрен – 28, крупная белая – 70, йоркшир – 19) по 7451 SNP.

Данные о секвенированных нуклеотидных последовательностях полных геномов *Sus scrofa domestica* расположены в базе Sequence Read Archive (SRA, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/sra>): PRJNA41185 (год регистрации проекта в BioProject – 2009, University of Aarhus, Дания), PRJNA176478 (2012, Uppsala University, Швеция), PRJNA186497 (2013, Novogene, США), PRJEB1683 (2013, Wageningen University & Research, Нидерланды), PRJNA239399 (2014, Agricultural Biotechnology Center, Венгрия), PRJNA260763 (2014, Seoul National University и NICEM – Южная Корея, BGI – КНР), PRJNA255085 (2014, Centre For Research in Agrigenomics, Испания), PRJEB9922 (2015, Wageningen University & Research, Нидерланды), PRJNA309108 (2016, Novogene, США), PRJNA322309 (2016, China Agricultural University, КНР), PRJNA343658 (2016, USDA-ARS-USMARC, США), PRJNA358108 (2016, China Agricultural University, КНР), PRJNA369600 (2017, Universitat Autònoma de Barcelona, Испания), PRJNA378496 (2017, China Agricultural University, КНР), PRJNA393920 (2017, INRA, Франция), PRJNA487172 (2018, Huazhong Agricultural University, КНР), PRJNA506339 (2018, University of Edinburgh, Шотландия), PRJNA507853 (2018, Sichuan Agricultural University, КНР), PRJNA485589 (2018, Agricultural Genome Institute at Shenzhen, КНР), PRJNA488960 (2018,

Huazhong Agriculture University, KHP), PRJNA550237 (2019, Jiangxi Agricultural University, KHP), PRJNA520978 (2019, Centre For Researchin Agrigenomics, Испания), PRJNA553106 (2019, Georg-August-University Goettingen, Германия), PRJNA671763 (2020, Chinese Academy of Agricultural Sciences, KHP), PRJNA626370 (2020, Centre for researchin agricultural Genomics, Испания), PRJNA622908 (2020, ETH Zurich, Швейцария).

Определение генотипа in silico. Для биоинформатического анализа были использованы геномы животных, представленные в открытом доступе в формате SRA, которые дополнительно конвертировали в формат *.fasta с использованием пакета SRA-Toolkit v.2.11. Для автоматизации процесса поиска нуклеотидных последовательностей *in silico*, фланкирующих искомый аллель, использовали программу, написанную на языке программирования Python v.3.10, в среде разработки программного обеспечения Jupyter Notebook. Хромосомная позиция SNP определена в версии сборки генома Sscrofa11.1 (GCF_000003025.6).

Статистический анализ данных. Дифференцирующий потенциал SNP определяли с использованием ROC-анализа в SPSS v.20.0. Количественную интерпретацию ROC дает показатель AUC (area under ROC curve) – площадь, ограниченная ROC-кривой и осью доли ложных положительных классификаций. При наличии нижней границы асимптотического 95 %-ного доверительного интервала, значение которой более 0,5, для параметра AUC (площадь под кривой) SNP позиционировалось как генетический маркер со значительным дифференцирующим потенциалом, более 0,7 – как генетический маркер с высоким дифференцирующим потенциалом.

Результаты и их обсуждение. Проведенный биоинформатический анализ, направленный на определение генотипа *in silico* для животных вида *Sus scrofa domestica*, позволил рассчитать частоты генотипов у пяти пород свиней – дюрок (выборка «DU»), ландрас («LA»), пьетрен (PI), крупная белая («LW») и йоркшир («YO»). Полученные результаты легли в основу математического анализа классификаций с применением ROC-кривых.

По причине наличия значительного практического материала, полученного в ходе выполнения данного исследования, считаем не возможным подробно предоставить все наши результаты. Подробный анализ для каждой породы свиней будет осуществлен в рамках отдельных публикаций. В то же время в сообщении представлены данные об участках в геноме *Sus scrofa domestica*, где в ходе селекции каждой породы сформировались кластеры (гаплотипы) SNP, молекулярно-генетический анализ которых позволит оценить чистопородность конкретной особи или наличие примесей других пород в исследуемой выборке животных. Сводная информация по наличию таких наиболее информативных кластеров представлена в таблице.

Для свиней породы дюрок нами выявлены 184 SNP со значительным дифференцирующим потенциалом ($p < 0,01$), для 24 из которых показан высокий дифференцирующий потенциал ($p < 7,50E-12$, нижняя граница (НГ) 95 %-ного доверительного интервала (ДИ) $>0,7$). На хромосоме 9 выявлен фрагмент длиной около 50 тыс. п. н., на котором определены четыре SNP (Chr.9:49010671, Chr.9:49034938, Chr.9:49042137 и Chr.9:49046617) с высоким дифференцирующим потенциалом. На данном участке хромосомы или непосредственно рядом с ним расположен ген *SORL1* (sortilin related receptor 1, NCBI Gene ID – 100626812), гомологичный ген у человека относится к семейству рецепторов липопротеинов низкой плотности (LDLR), кодируемый им протеин принимает участие в эндоцитозе. Также в этом фрагменте расположены локусы LOC110255448 и LOC102164776, функциональная роль которых на данный момент неизвестна, а также некодирующие РНК, которые участвуют в посттранскрипционной регуляции экспрессии генов, влияя как на стабильность, так и на трансляцию мРНК – microRNA mir-125b-1, microRNA let-7a-1, microRNA mir-100 и microRNA mir-9804. В нашей предыдущей работе был выявлен фрагмент длиной около 250 тыс. п. н. на хромосоме 14, на котором также определены SNP с высоким дифференцирующим потенциалом для породы свиней дюрок. На данном участке хромосомы или непосредственно рядом с ним расположены гены: *AICF*, *PRKGI*, *ASAH2* и *SGMS1* [1]. В ходе расширенного биоинформатического анализа нами выявлены дополнительные SNP с высоким дифференцирующим потенциалом в данном кластере – Chr.14:107457741, Chr.14:107794160 и Chr.14:107869191.

Расположение высокоинформативных SNP и их кластеров в геноме *Sus scrofa domestica* для дифференциации пород свиней дюрок (DU), ландрас (LA), пьетрен (PI), крупная белая (LW) и йоркшир (YO)

Schematic arrangement of highly informative regions in the *Sus scrofa domestica* genome for differentiation of Duroc (DU), Landrace (LA), Pietrain (PI), Large White (LW) and Yorkshire (YO) pig breeds

Порода Breed	Хромосомная позиция Chromosomal position	AUC	HG 95 % ДИ	ВГ 95 % ДИ	<i>p</i> -уровень <i>p</i> -level	Порода Breed	Хромосомная позиция Chromosomal position	AUC	HG 95 % ДИ	ВГ 95 % ДИ	<i>p</i> -уровень <i>p</i> -level
DU	Chr.4:9676649	0,7953	0,7434	0,8473	8,12E-15	LW	Chr.8:47482649	0,7037	0,6319	0,7755	4,22E-07
DU	Chr.7:106301845	0,8255	0,7710	0,8800	1,13E-17	LW	Chr.9:138661524	0,7090	0,6422	0,7757	2,11E-07
DU	Chr.8:45485535	0,7803	0,7255	0,8352	1,69E-13	LW	Chr.14:73886405	0,6926	0,6194	0,7657	1,74E-06
DU	Chr.8:47482649	0,8231	0,7718	0,8744	1,94E-17	LW	Chr.14:93947383	0,6852	0,6112	0,7593	4,23E-06
DU	Chr.9:25438712	0,7668	0,7122	0,8214	2,28E-12	LW	Chr.14:93968978	0,7153	0,6450	0,7856	9,01E-08
DU	Chr.9:49010671*	0,7958	0,7405	0,8511	7,34E-15	LW	Chr.14:98859586	0,7312	0,6625	0,7998	9,46E-09
DU	Chr.9:49034938	0,7721	0,7149	0,8293	8,39E-13	LW	Chr.14:107298278	0,6879	0,6169	0,7590	3,06E-06
DU	Chr.9:49042137	0,7737	0,7176	0,8298	6,14E-13	LW	Chr.14:107457741	0,6766	0,6041	0,7492	1,15E-05
DU	Chr.9:49046617	0,7729	0,7167	0,8291	7,22E-13	LW	Chr.15:84480210	0,6933	0,6209	0,7657	1,59E-06
DU	Chr.9:138661524	0,7604	0,7047	0,8161	7,50E-12	LW	Chr.15:84509213	0,6850	0,6160	0,7540	4,36E-06
DU	Chr.12:11541028	0,7875	0,7305	0,8445	4,01E-14	LW	Chr.X:24931575	0,7022	0,6317	0,7728	5,12E-07
DU	Chr.13:182876924	0,7892	0,7324	0,8461	2,83E-14	LW	Chr.X:53635886	0,7323	0,6605	0,8042	7,97E-09
DU	Chr.14:73886405	0,7681	0,7109	0,8253	1,80E-12	PI	Chr.3:64788078	0,7409	0,6584	0,8235	2,29E-05
DU	Chr.14:92116337	0,8149	0,7585	0,8713	1,22E-16	PI	Chr.3:70293190	0,6862	0,5756	0,7969	1,06E-03
DU	Chr.14:98859586	0,7540	0,6965	0,8115	2,41E-11	PI	Chr.5:45368146	0,2663	0,1811	0,3514	3,99E-05
DU	Chr.14:107457741	0,7448	0,6880	0,8017	1,21E-10	PI	Chr.7:101257337	0,7418	0,6442	0,8395	2,14E-05
DU	Chr.14:107794160	0,7618	0,7065	0,8172	5,76E-12	PI	Chr.8:41542706	0,7609	0,6647	0,8571	4,54E-06
DU	Chr.14:107869191	0,7434	0,6862	0,8005	1,56E-10	PI	Chr.9:48990007	0,6923	0,5910	0,7937	7,23E-04
DU	Chr.16:32192496	0,8180	0,7671	0,8688	6,20E-17	PI	Chr.9:138675793	0,6945	0,5780	0,8109	6,32E-04
DU	Chr.18:23850297	0,7405	0,6832	0,7978	2,56E-10	PI	Chr.12:11070623	0,6897	0,5947	0,7846	8,58E-04
LA	Chr.6:103109916	0,6635	0,5776	0,7494	4,37E-04	PI	Chr.13:136995166	0,6906	0,5913	0,7899	8,08E-04
LA	Chr.6:121005974	0,7155	0,6375	0,7936	3,56E-06	PI	Chr.13:177262726	0,6918	0,5782	0,8053	7,51E-04
LA	Chr.8:41620747	0,7005	0,6020	0,7990	1,62E-05	PI	Chr.13:196377418	0,7163	0,6100	0,8226	1,44E-04
LA	Chr.8:47482649	0,6800	0,5873	0,7726	1,08E-04	PI	Chr.14:106836471	0,6843	0,5751	0,7936	1,20E-03
LA	Chr.9:25438712	0,7091	0,6312	0,7870	6,90E-06	PI	Chr.14:107794160	0,7198	0,6207	0,8190	1,12E-04
LA	Chr.9:48882095	0,7074	0,6281	0,7866	8,19E-06	PI	Chr.15:79166362	0,6988	0,5862	0,8114	4,75E-04
LA	Chr.9:49034938	0,6578	0,5718	0,7437	6,90E-04	PI	Chr.15:79169250	0,7701	0,6771	0,8631	2,06E-06

LA	Chr.9:59498749	0,6725	0,5935	0,7515	2,07E-04	PI	Chr.15:79172228	0,7143	0,6052	0,8234	1,65E-04
LA	Chr.9:138712218	0,6743	0,5958	0,7528	1,77E-04	PI	Chr.15:84477930	0,6903	0,5989	0,7817	8,23E-04
LA	Chr.12:11541028	0,6902	0,6040	0,7763	4,31E-05	PI	Chr.16:49010636	0,7105	0,5810	0,8400	2,15E-04
LA	Chr.14:11430036	0,6580	0,5682	0,7479	6,77E-04	PI	Chr.16:49283730	0,7201	0,6170	0,8233	1,09E-04
LA	Chr.14:37687463	0,6695	0,5862	0,7528	2,67E-04	PI	Chr.18:23850297	0,7175	0,6207	0,8143	1,32E-04
LA	Chr.14:1121481	0,6602	0,5684	0,7519	5,72E-04	YO	Chr.3:64757843	0,7418	0,6455	0,8382	4,44E-04
LA	Chr.14:107298278	0,6590	0,5880	0,7300	6,25E-04	YO	Chr.3:77687689	0,6808	0,5588	0,8028	8,64E-03
LA	Chr.15:56426211	0,6732	0,6019	0,7444	1,96E-04	YO	Chr.9:138675793	0,7423	0,6271	0,8575	4,34E-04
LA	Chr.15:79166362	0,6841	0,5922	0,7760	7,50E-05	YO	Chr.12:44840898	0,7024	0,5796	0,8253	3,28E-03
LA	Chr.15:79172228	0,6663	0,5726	0,7601	3,47E-04	YO	Chr.13:134572869	0,7162	0,5940	0,8383	1,69E-03
LA	Chr.18:23850297	0,6612	0,5714	0,7510	5,25E-04	YO	Chr.13:196377418	0,7150	0,6148	0,8152	1,79E-03
LA	Chr.X:25039541	0,6894	0,6022	0,7767	4,61E-05	YO	Chr.14:72991761	0,6743	0,5671	0,7815	1,14E-02
LA	Chr.X:59154182	0,6655	0,5880	0,7431	3,70E-04	YO	Chr.14:92116537	0,7148	0,6158	0,8137	1,81E-03
LW	Chr.3:118879246	0,7094	0,6377	0,7810	2,00E-07	YO	Chr.14:98843824	0,6948	0,5614	0,8282	4,68E-03
LW	Chr.4:9676649	0,6886	0,6160	0,7611	2,82E-06	YO	Chr.14:107457741	0,6899	0,5727	0,8070	5,83E-03
LW	Chr.6:146485746	0,6823	0,6079	0,7567	5,99E-06	YO	Chr.14:107869191	0,6885	0,5770	0,8000	6,20E-03
LW	Chr.7:17730613	0,6789	0,6053	0,7525	8,89E-06	YO	Chr.15:79172228	0,6818	0,5663	0,7972	8,30E-03
LW	Chr.7:48837152	0,6818	0,6124	0,7512	6,36E-06	YO	Chr.16:17901382	0,6847	0,5693	0,8002	7,30E-03
LW	Chr.7:52269732	0,7241	0,6546	0,7935	2,64E-08	YO	Chr.16:32192496	0,7291	0,6094	0,8487	8,79E-04
LW	Chr.7:106301845	0,6864	0,6192	0,7536	3,68E-06	YO	Chr.18:3442709	0,7059	0,5863	0,8256	2,78E-03
LW	Chr.8:45485535	0,7016	0,6276	0,7757	5,52E-07						

Примечание: * – отмечены кластеры SNP.
 Note: * – SNP clusters are marked.

Для свиней породы ландрас определены 52 SNP со значительным дифференцирующим потенциалом ($p < 0,01$), для 7 из них НГ 95 %-ного ДИ для $AUC > 0,6$ ($p < 0,001$). На хромосоме 15 в последовательности гена *TTN* (titin, NCBI Gene ID – 100519519) определено два SNP (Chr.15:79166362, Chr.15:79172228) с высоким дифференцирующим потенциалом для этой породы. *TTN* кодирует белок поперечнополосатых мышц, который служит шаблоном для адгезии микрофиламентов при сборке сократительного механизма в мышечных клетках. В немышечных клетках *TTN* играет роль в конденсации хромосом и сегрегации хромосом во время митоза. Для ранее выявленных SNP НГ 95 %-ного ДИ находилась в диапазоне 0,511–0,610 [1], в то время как для ряда новых SNP это значение превышает 0,6 (таблица).

Для свиней породы пьетрен выявлены 39 SNP со значительным дифференцирующим потенциалом ($p < 0,01$), для 9 из них НГ 95 %-ного ДИ для $AUC > 0,6$ ($p < 0,001$). На хромосоме 15 выявлен фрагмент длиной около 10 тыс. п. н., на котором определены три SNP (Chr.15:79166362, Chr.15:79169250 и Chr.15:79172228) с высоким дифференцирующим потенциалом. Непосредственно за этими SNP в направлении $5' > 3'$ цепи ДНК расположен ген *MAP3K20* (mitogen-activated protein kinase 20, NCBI Gene ID – 100152572), который кодирует белок, опосредующий передачу сигналов гамма-излучения, что приводит к остановке клеточного цикла. Его активность важна в регуляции контрольных точек клеточного цикла.

Для свиней породы крупная белая выявлены 104 SNP со значительным дифференцирующим потенциалом ($p < 0,01$), для 22 из них НГ 95 %-ного ДИ для $AUC > 0,6$ ($p < 0,001$). На хромосоме 14 выявлен фрагмент длиной около 30 тыс. п. н., на котором определены два SNP (Chr.14:93947383, Chr.14:93968978) с высоким дифференцирующим потенциалом для этой породы. Рядом с ним расположен ген *ZWINT* (ZW10 interacting kinetochore protein, NCBI Gene ID – 100623641), который участвует в функционировании кинетохора. Также, согласно данным баз Ensembl на февраль 2022 г., в этом регионе расположено несколько длинных некодирующих РНК (long ncRNAs, lncRNA), функция которых неизвестна – ENSSSCG00000055376, ENSSSCG00000044100. На хромосоме 15 также выявлен фрагмент длиной около 30 тыс. п. н., на котором определены SNP (Chr.15:84480210, Chr.15:84509213), информативные для дифференциации данной породы. Так же как и для свиней породы ландрас, для крупной белой на хромосоме 15 в последовательности гена *TTN* определено несколько SNP с высоким дифференцирующим потенциалом. Таким образом, можно отметить, что для ряда SNP в пределах одного гена выявлены значительные различия по частоте альтернативных аллелей у пород крупная белая и ландрас, при этом каждый из аллелей является информативным. Роль этих SNP для дифференциации пород предстоит оценить в будущем.

Для свиней породы йоркшир определено 14 SNP со значительным дифференцирующим потенциалом ($p < 0,01$), для 5 из них НГ 95 %-ного ДИ $> 0,6$ ($p < 0,002$). На хромосоме 14 выявлены два близко расположенных кластера (расстояние между ними – около 500 тыс. п. н.), на которых определены два SNP (Chr.14:107457741 и Chr.14:107869191) с высоким дифференцирующим потенциалом. Полиморфный локус Chr.14:107457741 расположен в интронной области гена *CC2D2B* (coiled-coiled C2 domain containing 2B, NCBI Gene ID – 100524048), полиморфный локус Chr.14:107869191 – в интронной области гена *TLL2* (tolloidlike 2, NCBI Gene ID – 100157589).

Для ряда SNP со значительным или высоким дифференцирующим потенциалом ранее показана ассоциация с QTL: согласно классификации Pig QTLdb для класса «Exterior» (экстерьерные характеристики) – Chr.13:182876924 [3], Chr.13:196377418 [3], Chr.13:177262726 [4]; для класса «Health» (общее состояние организма, здоровье) – Chr.13:134572869 [5], Chr.13:136995166 [6], Chr.14:107298278 [7], Chr.14:107457741 [7], Chr.14:107794160 [7], Chr.14:107869191 [7], Chr.16:17901382 [8], Chr.18:23850297 [9], Chr.6:146485746 [10], Chr.7:17730613 [7], Chr.8:45485535 [11] и Chr.8:47482649 [12]; для класса «Meat and Carcass» (качество мяса, размеры) – Chr.14:61121481 [13], Chr.16:32192496 [14], Chr.16:49283730 [14], Chr.4:9676649 [15], Chr.7:101257337 [16], Chr.8:41542706 [17], Chr.8:41620747 [17] и Chr.9:25438712 [9]; для класса «Production» (количество товарной продукции) – Chr.12:11541028 [18], Chr.9:59498749 [19]; для класса «Reproduction» (характеристика потомства) – Chr.12:11070623 [20].

Таким образом, выявление SNP, для которых не только определены высокие значения AUC, но и ассоциации с QTL, позволит одновременно решать задачу по оценке чистопородности животных и проявлению хозяйственно полезных признаков.

Заключение. Таким образом, расширенный биоинформатический анализ, который включал в себя определение генотипа по 7451 SNP для 248 геномов *Sus scrofa domestica*, позволил выявить суммарно 393 SNP для всех пород, для которых имеется существенная разница в частоте альтернативных аллелей у свиней дюрок, ландрас, пьетрен, крупная белая и йоркшир. Обозначены кластеры в пределах хромосом, в которых плотность SNP с высоким дифференцирующим потенциалом наиболее высока. Например, для нескольких пород (ландрас и крупная белая) данные кластеры расположены в пределах одного гена – *TTN*, что может быть связано с жесткой селекцией свиней на повышение мясной продуктивности.

Полученные результаты позволяют разработать тест-модели для определения чистопородности свиней и, как следствие, поддержания на оптимальном уровне таких параметров популяции (пород, линий), как уровень гетерозиготности, инбредности, генетической дифференциации и др., что будет способствовать повышению продуктивности животных и определению тактики и стратегии разведения и дальнейшего совершенствования пород свиней.

В целом, данный подход и объем проведенных исследований является на данный момент наиболее полным биоинформатическим анализом геномов *Sus scrofa domestica* для экстраполяции полученных данных на породы, разводимые в Республике Беларусь.

Благодарности. Исследование выполнено в рамках ГПНИ «Биотехнологии-2» (2021–2025 гг.), подпрограмма «Геномика, эпигеномика, биоинформатика», НИР «Разработка системы генетического анализа для определения чистопородности свиней на основе изучения SNP-локусов».

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Acknowledgment. The study was carried out within the framework of the State Scientific Research Program “Biotechnology-2” (2021–2025), subprogram “Genomics, epigenomics, bioinformatics”, research work “Development of a genetic analysis system for determining the purity of pigs based on the study of SNP loci”.

Conflict of interests. The authors declare no conflicts of interest.

Список использованных источников

1. Биоинформатический анализ геномов коммерческих пород домашних свиней для идентификации породоспецифичных SNP / В. Н. Кипень [и др.] // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. аграр. навук. – 2021. – Т. 59, № 4. – С. 464–476. <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2021-59-4-464-476>
2. Analysis of HEPH Gene Polymorphism on the X Chromosome for Identification of Wild Boar and Domestic Pig / V. N. Kipen [et al.] // Russ. J. Genet. – 2020. – Vol. 56. – P. 1099–1108. <https://doi.org/10.1134/s1022795420080062>
3. An association and haplotype analysis of porcine maternal infanticide: a model for human puerperal psychosis? / C. R. Quilter [et al.] // Am. J. Med. Genet. B Neuropsychiatr. Genet. – 2012. – Vol. 159(B), N 8. – P. 908–927. <https://doi.org/10.1002/ajmg.b.32097>
4. A study of vertebra number in pigs confirms the association of vertnin and reveals additional QTL / G. A. Rohrer [et al.] // BMC Genet. – 2015. – Vol. 16, N 1. <https://doi.org/10.1186/s12863-015-0286-9>
5. Refined candidate region for F4ab/ac enterotoxigenic *Escherichia coli* susceptibility situated proximal to MUC13 in pigs / T. Goetstouwers [et al.] // PLoS One. – 2014. – Vol. 9, N 8. – Art. e105013. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0105013>
6. A genome-wide association study identifies two novel promising candidate genes affecting *Escherichia coli* F4ab/F4ac susceptibility in swine / Wei-Xuan Fu [et al.] // PLoS One. – 2012. – Vol. 7, N 3. – Art. e32127. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0032127>
7. Genome-wide association studies for hematological traits in Chinese Sutan pigs / Feng Zhang [et al.] // BMC Genet. – 2014. – Vol. 15, N 1. <https://doi.org/10.1186/1471-2156-15-41>
8. A substitution in the ligand binding domain of the porcine glucocorticoid receptor affects activity of the adrenal gland / E. Murani [et al.] // PLoS One. – 2012. – Vol. 7, N 9. – Art. e45518. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0045518>
9. Genome-wide association study for T lymphocyte subpopulations in swine / Xin Lu [et al.] // BMC Genomics. – 2012. – Vol. 13, N 1. – Art. 488. <https://doi.org/10.1186/1471-2164-13-488>
10. A genome-wide association analysis for porcine serum lipid traits reveals the existence of age-specific genetic determinants / A. Manunza [et al.] // BMC Genomics. – 2014. – Vol. 15, N 1. – Art. 758. <https://doi.org/10.1186/1471-2164-15-758>
11. Genetic dissection of blood lipid traits by integrating genome-wide association study and gene expression profiling in a porcine model / C. Chen [et al.] // BMC Genomics. – 2013. – Vol. 14, N 1. – Art. 848. <https://doi.org/10.1186/1471-2164-14-848>
12. Genome-wide association study reveal constant and specific loci for hematological traits at three time stages in a White Duroc × Erhualian F2 resource population / Z. Zhang [et al.] // PLoS One. – 2013. – Vol. 8, N 5. – Art. e63665. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0063665>

13. Discovery of candidate genes for muscle traits based on GWAS supported by eQTL-analysis / S. Ponsuksili [et al.] // *Int. J. Biol. Sci.* – 2014. – Vol. 10, N 3. – P. 327–337. <https://doi.org/10.7150/ijbs.8134>
14. Genome-wide association studies for fatty acid metabolic traits in five divergent pig populations / W. Zhang [et al.] // *Sci. Rep.* – 2016. – Vol. 6, N 1. – Art. 24718. <https://doi.org/10.1038/srep24718>
15. Genome-wide association study identifies Loci for body composition and structural soundness traits in pigs / B. Fan [et al.] // *PLoS One.* – 2011. – Vol. 6, N 2. – Art. e14726. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0014726>
16. SNP- and haplotype-based genome-wide association studies for growth, carcass, and meat quality traits in a Duroc multigenerational population / S. Sato [et al.] // *BMC Genet.* – 2016. – Vol. 17, N 1. – Art. 60. <https://doi.org/10.1186/s12863-016-0368-3>
17. Evaluation of QTL for carcass merit and meat quality traits in a US commercial Duroc population / I. Choi [et al.] // *Meat Sci.* – 2012. – Vol. 92, N 2. – P. 132–138. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2012.04.023>
18. Genome Wide Association Analysis Reveals New Production Trait Genes in a Male Duroc Population / K. Wang [et al.] // *PLoS One.* – 2015. – Vol. 10, N 9. – Art. e0139207. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0139207>
19. Genome-wide association study on legendre random regression coefficients for the growth and feed intake trajectory on Duroc Boars / J. T. Howard [et al.] // *BMC Genet.* – 2015. – Vol. 16. <https://doi.org/10.1186/s12863-015-0218-8>
20. Genome-wide prediction of age at puberty and reproductive longevity in sows / J. K. Tart [et al.] // *Anim Genet.* – 2013. – Vol. 44, N 4. – P. 387–397. <https://doi.org/10.1111/age.12028>

References

1. Kipen V. N., Mikhailova M. E., Snytkov E. V., Romanishko E. L., Ivanova E. V., Sheyko R. I. Bioinformatic analysis of genomes of commercial breeds of domestic pigs for identification of breed-specific SNPs. *Vestsi Natsyyanal' nay akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2021, vol. 59, no. 4, pp. 464–476 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2021-59-4-464-476>
2. Kipen V. N., Ivanova E. V., Snytkov E. V., Verchuk A. N. Analysis of HEPH Gene Polymorphism on the X Chromosome for Identification of Wild Boar and Domestic Pig. *Russian Journal of Genetics*, 2020, vol. 56, no. 9, pp. 1099–1108. <https://doi.org/10.1134/s1022795420080062>
3. Quilter C. R., Sargent C. A., Bauer J., Bagga M. R., Reiter C. P., Hutchinson E. L., Southwood O. I., Evans G., Mileham A., Griffin D. K., Affara N. A. An association and haplotype analysis of porcine maternal infanticide: a model for human puerperal psychosis. *American Journal of Medical Genetics Part B: Neuropsychiatric Genetics*, 2012, vol. 159 (B), no. 8, pp. 908–927. <https://doi.org/10.1002/ajmg.b.32097>
4. Rohrer G. A., Nonneman D. J., Wiedmann R. T., Schneider J. F. A study of vertebra number in pigs confirms the association of vertnin and reveals additional QTL. *BMC Genet*, 2015, vol. 16, no. 1. <https://doi.org/10.1186/s12863-015-0286-9>
5. Goetstouwers T., Van Poucke M., Coppieters W., Nguyen V. U., Melkebeek V., Coddens A., Van Steendam K., Deforce D., Cox E., Peelman L. J. Refined candidate region for F4ab/ac enterotoxigenic *Escherichia coli* susceptibility situated proximal to MUC13 in pigs. *PLoS One*, 2014, vol. 9, no. 8, art. e105013. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0105013>
6. Fu W.-X., Liu Y., Lu X., Niu X.-Y., Ding X.-D., Liu J.-F., Zhang Q. A genome-wide association study identifies two novel promising candidate genes affecting *Escherichia coli* F4ab/F4ac susceptibility in swine. *PLoS One*, 2012, vol. 7, no. 3, art. e32127. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0032127>
7. Zhang F., Zhang Z., Yan X., Chen H., Zhang W., Hong Y., Huang L. Genome-wide association studies for hematological traits in Chinese Sutan pigs. *BMC Genetics*, 2014, vol. 15, no. 1. <https://doi.org/10.1186/1471-2156-15-41>
8. Murani E., Reyer H., Ponsuksili S., Fritschka S., Wimmers K. A substitution in the ligand binding domain of the porcine glucocorticoid receptor affects activity of the adrenal gland. *PLoS One*, 2012, vol. 7, no. 9, art. e45518. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0045518>
9. Lu X., Fu W.-X., Luo Y.-R., Ding X.-D., Zhou J.-P., Liu Y., Liu J.-F., Zhang Q. Genome-wide association study for T lymphocyte subpopulations in swine. *BMC Genomics*, 2012, vol. 13, no. 1, art. 488. <https://doi.org/10.1186/1471-2164-13-488>
10. Manunza A., Casellas J., Quintanilla R., González-Prendes R., Pena R. N., Tibau J., Mercadé A., Castelló A., Aznárez N., Hernández-Sánchez J., Amills M. A genome-wide association analysis for porcine serum lipid traits reveals the existence of age-specific genetic determinants. *BMC Genomics*, 2014, vol. 15, no. 1, art. 758. <https://doi.org/10.1186/1471-2164-15-758>
11. Chen C., Yang B., Zeng Z., Yang H., Liu C., Ren J., Huang L. Genetic dissection of blood lipid traits by integrating genome-wide association study and gene expression profiling in a porcine model. *BMC Genomics*, 2013, vol. 14, no. 1, art. 848. <https://doi.org/10.1186/1471-2164-14-848>
12. Zhang Z., Hong Y., Gao J., Xiao S., Ma J., Zhang W., Ren J., Huang L. Genome-wide association study reveals constant and specific loci for hematological traits at three time stages in a White Duroc × Erhualian F2 resource population. *PLoS One*, 2013, vol. 8, no. 5, art. e63665. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0063665>
13. Ponsuksili S. Discovery of candidate genes for muscle traits based on GWAS supported by eQTL-analysis. *International Journal of Biological Sciences*, 2014, vol. 10, no. 3, pp. 327–337. <https://doi.org/10.7150/ijbs.8134>
14. Zhang W., Yang B., Zhang J., Cui L., Ma J., Chen C., Ai H., Xiao S., Ren J., Huang L. Genome-wide association studies for fatty acid metabolic traits in five divergent pig populations. *Scientific Reports*, 2016, vol. 6, no. 1, art. 24718. <https://doi.org/10.1038/srep24718>
15. Fan B., Onteru S. K., Du Z.-Q., Garrick D. J., Stalder K. J., Rothschild M. F. Genome-wide association study identifies Loci for body composition and structural soundness traits in pigs. *PLoS One*, 2011, vol. 6, no. 2, art. e14726. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0014726>

16. Sato S., Uemoto Y., Kikuchi T., Egawa S., Kohira K., Saito T., Sakuma H., Miyashita S., Arata S., Kojima T., Suzuki K. SNP- and haplotype-based genome-wide association studies for growth, carcass, and meat quality traits in a Duroc multigenerational population. *BMC Genetics*, 2016, vol. 17, no. 1, art. 60. <https://doi.org/10.1186/s12863-016-0368-3>

17. Choi I., Bates R. O., Raney N. E., Steibel J. P., Ernst C. W. Evaluation of QTL for carcass merit and meat quality traits in a US commercial Duroc population. *Meat Science*, 2012, vol. 92, no. 2, pp. 132–138. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2012.04.023>

18. Wang K., Liu D., Hernandez-Sanchez J., Chen J., Liu C., Wu Z., Fang M., Li N. Genome Wide Association Analysis Reveals New Production Trait Genes in a Male Duroc Population. *PLoS One*, 2015, vol. 10, no. 9, art. e0139207. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0139207>

19. Howard J. T., Jiao S., Tiezzi F., Huang Y., Gray K. A., Maltecca C. Genome-wide association study on legendre random regression coefficients for the growth and feed intake trajectory on Duroc Boars. *BMC Genetics*, 2015, vol. 16, no. 1. <https://doi.org/10.1186/s12863-015-0218-8>

20. Tart J. K., Johnson R. K., Bundy J. W., Ferdinand N. N., McKnite A. M., Wood J. R., Miller P. S., Rothschild M. F., Spangler M. L., Garrick D. J., Kachman S. D., Ciobanu D. C. Genome-wide prediction of age at puberty and reproductive longevity in sows. *Animal Genetics*, 2013, vol. 44, no. 4, pp. 387–397. <https://doi.org/10.1111/age.12028>

Информация об авторах

Кипень Вячеслав Николаевич – канд. биол. наук, вед. науч. сотрудник. Институт генетики и цитологии НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: v.kipen@igc.by. ORCID: 0000-0002-7822-0746.

Снытков Евгений Владимирович – мл. науч. сотрудник. Институт генетики и цитологии НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: evsnytkov@gmail.com. ORCID: 0000-0001-7961-1952.

Михайлова Мария Егоровна – канд. биол. наук, заведующий лабораторией. Институт генетики и цитологии НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: M. Mikhailova@igc.by. ORCID: 0000-0001-6087-5069.

Шейко Руслан Иванович – член-корреспондент, д-р с.-х. наук, профессор, директор. Институт генетики и цитологии НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: R.I.Sheyko@igc.by. ORCID: 0000-0001-5442-566X.

Information about the authors

Kipen Viachaslau N. – Ph. D. (Biology), Leading Researcher. Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: v.kipen@igc.by. ORCID: 0000-0002-7822-0746.

Snytkov Evgenij V. – Junior Researcher. Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: evsnytkov@gmail.com. ORCID: 0000-0001-7961-1952.

Mikhailova Mariya E. – Ph. D. (Biology), Head of the Laboratory. Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: M. Mikhailova@igc.by. ORCID: 0000-0001-6087-5069.

Sheyko Ruslan I. – Corresponding Member, D. Sc. (Agrarian), Professor. Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: R.I.Sheyko@igc.by. ORCID: 0000-0001-5442-566X.

С. В. Суховеева, Е. М. Кабачевская, академик И. Д. Волотовский

*Институт биофизики и клеточной инженерии Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь*

ГРАВИМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПОЛИСАХАРИДНОГО СОСТАВА СТЕБЛЯ ТОМАТА НА ФОНЕ ДЕЙСТВИЯ ГРАВИТАЦИОННОГО И ФИТОГОРМОНАЛЬНОГО СИГНАЛОВ

Аннотация. Изучена динамика содержания различных групп полисахаридов клеточной стенки в клетках стеблей томата при развитии ответа растений на гравитостимуляцию и фитогормональную обработку. Показано, что гравитостимуляция вызывает изменения относительного содержания полисахаридов клеточной стенки стебля в зоне гравитропического изгиба в период времени 3–6 ч. При этом в верхней и нижней частях стебля происходят преимущественно разнонаправленные изменения, приводящие в конечном итоге к заметным биохимическим различиям между двумя частями стебля, что и позволяет ему изгибаться за счет неравномерного роста клеток в разных частях стебля. При действии гравитостимуляции и эпибрасиностероида эпина изменения в полисахаридном составе проявляются раньше (уже через 1 ч после воздействия) во времени, чем при одиночной гравитостимуляции, а при воздействии этефона и гравитостимуляции позже (лишь с 6 ч воздействия).

Ключевые слова: растения томата (*Lycopersicon esculentum* L.), гравитропизм, полисахариды, этилен, этефон, эпин, лигнин, целлюлоза, пектин

Для цитирования. Суховеева, С. В. Гравиметрический анализ полисахаридного состава стебля томата на фоне действия гравитационного и фитогормонального сигналов / С. В. Суховеева, Е. М. Кабачевская, И. Д. Волотовский // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2022. – Т. 66, № 3. – С. 310–320. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-3-310-320>

Sviatlana V. Sukhaveyeva, Alena M. Kabachevskaya, Academician Igor D. Volotovski

*Institute of Biophysics and Cell Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Republic of Belarus*

GRAVIMETRIC ANALYSIS OF TOMATO STEMS IN THE PERCEPTION OF A GRAVITATIONAL SIGNAL

Abstract. The dynamics of the content of various groups of cell wall polysaccharides in the cells of tomato stems during the development of the plant's response to gravitational stimulation and phytohormonal treatment was studied. It has been shown that gravitational stimulation causes changes in the relative content of stem cell wall polysaccharides in the zone of gravitropic bending over a period of 3–6 hours. At the same time, predominantly multidirectional changes occur in the upper and lower halves of the stem, which ultimately leads to noticeable biochemical differences between the two parts of the stem, which allows it, in all likelihood, to bend due to an uneven growth of cells in different parts of the stem. Under the action of gravitational stimulation and epibrassinosteroid epine, changes in the polysaccharide composition appear earlier (already 1 hour after exposure) in time than with a single gravitational stimulation, and under the influence of ethephon and gravitational stimulation later (only from 6 hours of exposure).

Keywords: tomato (*Solanum lycopersicum* L.), gravitropism, polysaccharides, ethylene, ethephon, epine, lignin, cellulose, pectin

For citation. Sukhaveyeva S. V., Kabachevskaya A. M., Volotovski I. D. Gravimetric analysis of tomato stems in the perception of a gravitational signal. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2022, vol. 66, no. 3, pp. 310–320 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-3-310-320>

Введение. Тропизмы – важные реакции направленного роста растений в ответ на действие факторов окружающей среды, благодаря чему растение занимает в пространстве координаты, соответствующие его оптимальному функционированию.

Определяют фототропизмы, гравитропизмы, хемотропизмы и механотропизмы, каждый из которых индуцируется различающимися по природе физическими воздействиями [1], длитель-

ности ответа и его обратимости. Благодаря гравитропизмам побеги растения направляются вверх, а корни вниз, тем самым позволяя каждому органу контактировать со средой, подходящей для обеспечения его жизнедеятельности. Эта тропная реакция относится к длительным и обратимым регуляторным процессам.

Выделяют три основных этапа формирования гравитропического ответа: восприятие гравитационного сигнала, его трансдукция, развитие адаптационного ответа, заключающегося в активации ассиметричного роста клеток на верхней и нижней сторонах осевого органа растения. Такой рост становится возможным в результате перераспределения потоков фитогормона ауксина, что способствует изгибу органа растения и, в конечном итоге, восстановлению его естественной пространственной ориентации.

Рост клеток растений, окруженных жесткой клеточной стенкой, возможен только при временном, обратимом расщеплении структурных элементов, обеспечивающих ее жесткость. Для молодых растущих клеток характерна первичная клеточная стенка, которая затем у зрелых клеток заменяется на вторичную клеточную стенку [2].

В состав клеточной стенки входят микрофибриллы целлюлозы, которые окружены матриксом из гемицеллюлоз, пектинов и гликопротеинов.

Рост клеток и перестройки элементов клеточной стенки находятся под сложной фитогормональной регуляцией. К числу фитогормонов, способных регулировать рост клеток растяжением, относятся прежде всего ауксины и гиббереллины, действие которых наиболее подробно изучено [3]. Известно, что гравистимуляция через ряд сигнальных посредников вызывает перераспределение транспортных потоков ауксина, что приводит к модуляции процессов роста клеток, последующему ускоренному направленному росту (тропизму) гравистимулированного органа и его переориентации по отношению вектора силы тяжести. Другие фитогормоны, такие как брассиностероиды (БС) и этилен, также контролируют процессы роста клеток и, по-видимому, гравитропический ответ. Особенности регуляции роста клеток растяжением фитогормонами БС и этиленом при гравистимуляции в различных органах растений далеки от полного понимания и требуют детального изучения.

Кроме того, перестройки клеточной стенки во время развития различных физиологических реакций растений все еще полностью не охарактеризованы.

Ранее нами было показано, что после гравистимуляции растений томата в клетках их верхушечных листьев быстро и временно изменяется экспрессия большого числа генов, принадлежащих к семействам, ассоциированным с контролем перестройки клеточной стенки, плазматической мембраны, сигналинга, транспорта и метаболизма ростовых фитогормонов [4]. Эти изменения фиксируются в пределах 15 мин – 6 ч после начала гравистимуляции и в значительной степени модулируются действием экзогенных фитогормонов этилена и брассиностероида эпина. Эпин ускоряет гравитропический ответ, этилен – ингибирует его. Молекулярно-биологические изменения, наблюдаемые в клетках листьев, сопровождаются синхронным формированием изгиба стебля вверх, что позволяет предполагать, что листья чувствительны к изменению положения в пространстве и процессы, протекающие в них, важны для изменений в тканях стебля. Интересным представляется также оценить изменения в содержании полисахаридов клеточной стенки клеток стебля в тот же период времени, когда формируется его изгиб и модулируется экспрессия генов в клетках листьев томата.

Целью данной работы стала оценка характера временной зависимости перестроек элементов клеточной стенки клеток стебля томата (*Solanum lycopersicum* L.) от гравистимуляции, а также возможной роли фитогормонов этилена и БС в регуляции этих процессов, для чего был проведен сравнительный анализ полисахаридного состава стеблей растений без наклона (контроль) и гравистимулированных растений в различные временные интервалы после воздействия одиночного гравистимула, гравистимула и предшественника этилена этефона, гравистимула и синтетического БС эпина.

Материалы и методы исследования. В качестве объекта исследования использовали стебли 50-дневных растений томата. Растения выращивали при 16-часовом световом дне (освещение полихроматическим белым светом, 40 Вт, 150 мкмоль м⁻²с⁻¹) при температуре 24 °С. Грави-

стимуляция проводилась путем поворота растений на 90° относительно гравитационного вектора Земли. Для исключения побочного эффекта условий освещенности и возможного развития дополнительной фототропической реакции после поворота растений горизонтально, гравистимуляцию проводили в темноте, предварительно поместив растения контрольных и экспериментальных групп в темноту на 24 ч для адаптации. После адаптации растения поворачивались на бок и выдерживались в горизонтальном положении в течение различных промежутков времени (от 15 мин до 24 ч). Часть опытных растений обрабатывалась (до переноса растений в темноту и гравистимуляции) либо раствором этефона (Sigma, Германия) в концентрации 100 мг/л, либо раствором (200 мкл/л) эпина (производства ИБОХ НАНБ, ОАО «Белреахим») по одному разу в день в течение 8 дней.

Отбор растительной ткани контрольных и экспериментальных групп растений проводился на неактивном для фоторецепторов растений тусклом зеленом свете (лампа накаливания 15 Вт, стеклянный светофильтр с максимумом пропускания 470–605 нм, $0,45 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$).

Содержание разных групп полисахаридов в стеблях томата определяли гравиметрическим методом [5]. Для анализа навеску растительной ткани весом 0,5 г отбирали в нижней и верхней части стебля в зоне изгиба, высушивали в сушильном шкафу при 105°C до постоянного веса, взвешивая с точностью до 0,0001 г. Получали массу m . Затем образцы помещали в стеклянные пробирки, заливали 0,5 %-ным раствором оксалата аммония, выдерживали в течение 45 мин при 100°C , прополаскивали в воде, помещали в стеклянные бюксы, высушивали до постоянного веса, взвешивали с точностью до 0,0001 г. Получали массу m_1 . Отмытые от растворимых компонентов образцы помещали в стеклянные пробирки, заливали 4 %-ным раствором NaOH, автоклавировали в течение 60 мин при 120°C и давлении 1 атм, прополаскивали в воде, помещали в стеклянные бюксы, высушивали до постоянного веса, взвешивали с точностью до 0,0001 г. Получали показатель m_2 . Далее образцы помещали в стеклянные пробирки, заливали 17,5 %-ным раствором NaOH, выдерживали в течение 45 мин при 20°C , прополаскивали в воде (до нейтральной реакции), переносили в стеклянные бюксы, высушивали до постоянного веса, взвешивали с точностью до 0,0001 г. Получали показатель m_3 . Содержание основных групп полисахаридов рассчитывали по формулам, приведенным ниже:

$$\% \text{ растворимых веществ} = \frac{m - m_1}{m} 100 \%;$$

$$\% \text{ структурных полисахаридов} = 100 \% - \% \text{ растворимых веществ};$$

$$\% \text{ холоцеллюлозы} = \frac{m_2}{m} 100 \%;$$

$$\% \text{ лигнина} = \% \text{ структурных полисахаридов} - \% \text{ холоцеллюлозы};$$

$$\% \alpha\text{-целлюлозы} = \frac{m_3}{m} 100 \%;$$

$$\% \text{ гемицеллюлоз} = \% \text{ холоцеллюлозы} - \% \alpha\text{-целлюлозы},$$

где m – масса стебля, высушенного до постоянного веса; m_1 – масса после удаления пектинов и водорастворимых веществ; m_2 – масса стебля после удаления лигнина; m_3 – масса стебля после удаления гемицеллюлоз.

Результаты и их обсуждение. Содержание структурных полисахаридов в клеточной стенке оценивали в зоне изгиба стеблей 50-дневных растений томата.

На рис. 1 представлено относительное содержание пектин-содержащих водорастворимых веществ и структурных полисахаридов в верхней и нижней частях стебля при действии гравистимула (*a*), гравистимула и эпина (*b*), гравистимула и этефона (*c*) в период времени 0–24 ч. В контрольных группах (время – 0 ч) доля структурных полисахаридов в верхней и нижней части стебля составляла в среднем 60–62 %, пектин-содержащей фракции – 38–40 %.

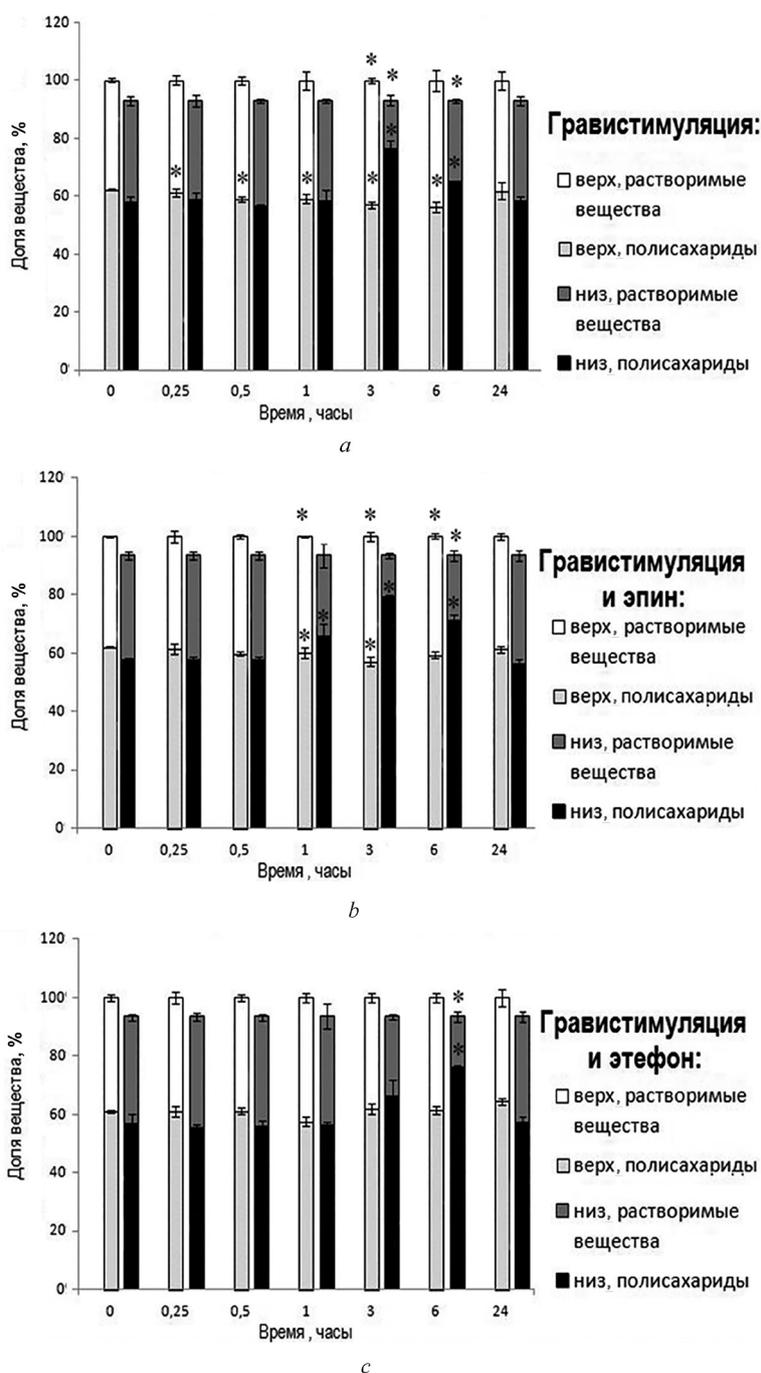


Рис. 1. Влияние гравистимуляции и фитогормонов эпина, этефона на относительное содержание пектин-содержащей фракции и структурных полисахаридов в зоне изгиба в стеблях томата: *a* – гравистимуляции, *b* – гравистимуляции и эпина, *c* – гравистимуляции и этефона

Fig. 1. Effect of gravistimulation and phytohormones epin, ethephone on the relative content of pectin fractions and structural polysaccharides in the bending zone in tomato stems: *a* – gravistimulation, *b* – gravistimulation and epin, *c* – gravistimulation and ethephone

При воздействии одиночной гравистимуляции и гравистимуляции и эпина наблюдалось уменьшение процентного содержания (до 54–57 %) структурных полисахаридов в верхней части стебля в период времени 0,25–6 ч, а доля растворимой фракции обратно пропорционально возрастала. В гравистимулированных растениях, обработанных этефоном, значимые изменения соотношения двух исследованных фракций в верхней части стебля отсутствовали.

В нижней части стебля доля структурных полисахаридов в зоне изгиба при воздействии одиночного гравистимула значительно возрастала в период времени 3–6 ч до 70–80 % (максимум – на 3 ч). При действии гравистимула и эпина значимое увеличение (до 74 %) доли структурных полисахаридов наблюдалось уже через 1 ч воздействия, максимум так же, как в случае одиночной гравистимуляции – на 3 ч воздействия (почти 85 %), далее отмечалось постепенное возвращение соотношения этих групп веществ до контрольных значений. Предварительное действие на растения этефоном приводило к замедлению и укорочению гравитропического ответа в нижней части стебля: максимум в доле содержания структурных полисахаридов наблюдался лишь на 6 ч гравистимуляции. Доля растворимой, пектин-содержащей фракции во всех образцах изменялась обратно пропорционально доле структурных полисахаридов в те же промежутки времени.

На рис. 2 представлены данные о соотношении основных групп веществ (холоцеллюлоза и лигнин), входящих в состав фракции структурных полисахаридов, при действии гравистимула (*a*), гравистимула и эпина (*b*), гравистимула и этефона (*c*) в период времени 0–24 ч в верхней и нижней частях стебля.

Доля холоцеллюлозы в контрольных образцах стеблей составляет примерно 50 %. В верхней половине стеблей перевернутых горизонтально растений наблюдалась тенденция к небольшому снижению ее содержания. Наименьшее содержание холоцеллюлозы при действии гравистимуляции или эпина и гравистимуляции наблюдалось после 3 ч, при воздействии гравистимуляции и этефона после 6 ч, к 24 ч воздействия их содержание повысилось обратно к контрольным значениям.

В нижней части зоны изгиба стебля при воздействии гравистимула доля холоцеллюлозы возрастала к 3 ч воздействия до 68 %, эпина и гравистимула – до 73 %. Предварительное действие на растения этефона приводило к сдвигу этого возрастания на более поздний срок – к 6 ч. К 24 ч ее содержание понизилось обратно к контрольным значениям во всех экспериментальных группах.

Объем лигнина в верхней и нижней частях стебля в зоне гравитропического изгиба составлял около 12 % в контрольных группах. В контрольной же группе, где растения предварительно обрабатывались фитогормоном этефоном, наблюдалось небольшое снижение содержания этого полимера.

При воздействии гравистимула или эпина и гравистимула относительное содержание лигнина в верхней и нижней частях места изгиба стебля снижалось на 1–6 ч воздействия. В этефон-обработанных растениях в верхней части стебля наблюдалось увеличение доли лигнина, в нижней – снижение.

На рис. 3 представлены данные о процентном содержании α -целлюлозы и гемицеллюлоз в верхней и нижней части стеблей томата при воздействии гравистимула (*a*), гравистимула и эпина (*b*), гравистимула и этефона (*c*).

В норме относительное содержание α -целлюлозы в тканях стебля томата составляет 45 %, гемицеллюлоз – 4,5 %. В верхней части зоны изгиба стебля значимых изменений в содержании целлюлозы не выявлялось. В нижней части при действии одиночного гравистимула в период времени 3–6 ч наблюдалось значимое увеличение доли целлюлозы до 63 %; при воздействии эпина и гравистимула увеличенное относительное содержание целлюлозы фиксировалось в период 1–6 ч; при предобработке этефоном – на 6 ч воздействия гравистимула. Содержание гемицеллюлоз в верхней и нижней частях стебля снижалось при действии гравистимула или эпина и гравистимула. При действии этефона и гравистимула в верхней части проявлялась тенденция к росту, в нижней – к снижению доли гемицеллюлозы.

Таким образом, гравиметрическим методом определено относительное содержание различных групп полисахаридов в стеблях томата в норме и при действии гравитропического и фитогормонального сигналов. В норме процентное соотношение водорастворимой пектин-содержащей фракции и структурных полисахаридов составляет примерно 37,6/62,4. В состав структурных полисахаридов входят целлюлоза (45,3 %), лигнин (12,2 %), гемицеллюлоза (4,2 %). Синтетический brassinosteroid эпин не влиял существенно на эти контрольные соотношения. Обработка

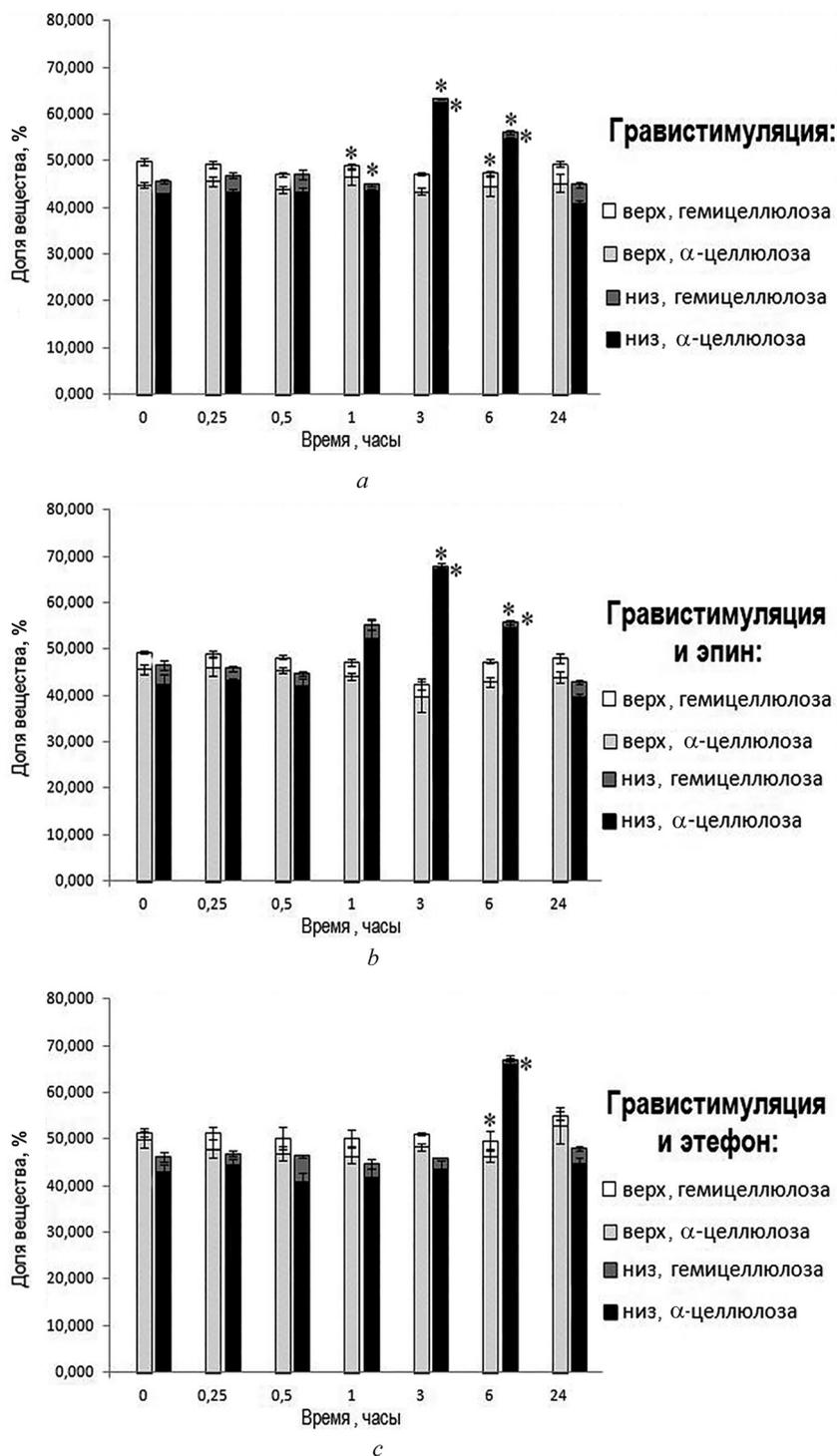


Рис. 2. Влияние гравистимуляции и фитогормонов эпина, этефона на относительное содержание гемицеллюлозы и α-целлюлозы в зоне изгиба в стеблях томата: *a* – гравистимуляции, *b* – гравистимуляции и эпина, *c* – гравистимуляции и этефона

Fig. 2. Effect of gravistimulation and phytohormones epin, ethephon on the relative content of hemicellulose and α-cellulose in the bending zone in tomato stems: *a* – gravistimulation, *b* – gravistimulation and epin, *c* – gravistimulation and ethephon

растений этефоном, предшественником фитогормона этилена, вызывала тенденцию к снижению доли лигнина, снижение доли гемицеллюлоз и небольшое увеличение доли целлюлозы. Информации о процентном содержании полисахаридов клеточной стенки клеток стебля у растений томата очень мало. В научной литературе имеются сведения, что в различных линиях близ-

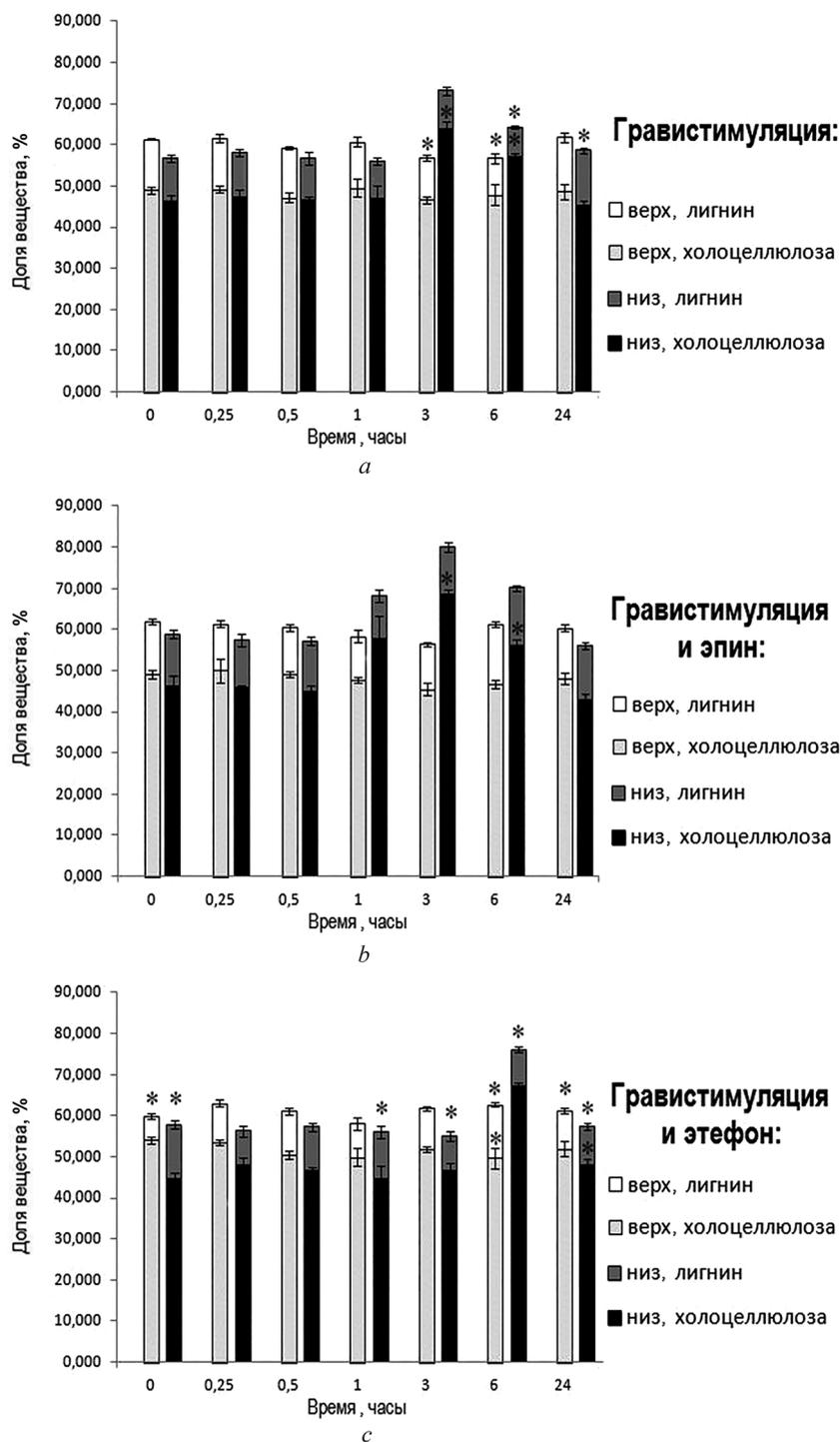


Рис. 3. Влияние гравистимуляции и фитогормонов эпина, этефона на относительное содержание лигнина и холоцеллюлозы в зоне изгиба в стеблях томата: *a* – гравистимуляции, *b* – гравистимуляции и эпина, *c* – гравистимуляции и этефона

Fig. 3. Effect of gravistimulation and phytohormones epin, ethephon on the relative content of lignin and holocellulose in the bending zone in tomato stems: *a* – gravistimulation, *b* – gravistimulation and epin, *c* – gravistimulation and ethephon

кородственного томату вида *Solanum pennellii*, активно используемому для интрогрессивной селекции, содержание целлюлозы составляет 40,7–55,9 г, гемицеллюлозы 2–6 г, лигнина 10,5–21,5 г на 100 г сухого вещества [6], что согласуется с данными, полученными в наших экспериментах для *Solanum lycopersicum*.

Нами установлено также, что гравистимуляция приводит к значительному перераспределению относительного содержания групп полисахаридов в стебле томата в период времени гравистимуляции от 1 до 6 ч, причем эти изменения разнонаправлены в верхней и нижней частях стебля в месте формирующегося изгиба. Следует отметить, что зарегистрированные изменения процентного содержания различных полисахаридов друг относительно друга не обязательно могут свидетельствовать об изменениях абсолютного количества этих веществ в тех же направлениях.

Каким образом изменяется количественный состав полисахаридов, образующих клеточную стенку тканей гравистимулированных растений, описано, хотя и косвенно, по изменениям моносахаридного состава клеточной стенки стебля льна (*Linum usitatissimum* L.). В данном исследовании сравнивалось содержание моносахаридов в клеточной стенке волокон флоэмы стеблей гравистимулированных растений с растениями контрольной группы. Моносахаридный анализ показал значительное преобладание целлюлозной глюкозы в клеточной стенке растений льна. Показано также наличие в клеточной стенке галактозы, галактуроновой кислоты, маннозы, ксилозы, рамнозы, арабинозы, происходящих от гемицеллюлоз и пектинов. При развитии гравитропического изгиба были показаны статистически значимые различия в увеличении количества галактозы и галактуроновой кислоты. Также из приведенных в сообщении данных можно сделать вывод о тенденции к повышению количества маннозы при гравистимуляции в стенках клеток верхней части стебля растений льна [6]. Следует отметить, что авторы исследовали моносахаридный состав стеблей льна через 24 ч после начала воздействия, так как из-за очень жестких волокон у льна изгиб формируется намного медленнее, чем у обычных травянистых растений, а по характеру формирования изгиба лен ближе к древесным растениям.

Полученные нами и другими авторами результаты свидетельствуют о тонких, быстрых и обратимых перестройках в клеточной стенке клеток стеблей растений при формировании гравитропического изгиба. Эти изменения могут быть связаны как с модификацией уже имеющих слоев клеточной стенки, так и с биосинтезом новых компонентов. Можно предположить, что в перестройке стенок клетки задействованы одновременно оба механизма.

Ранее нами было установлено, что при действии на растения томата одиночного гравистимула или эпина и последующей гравистимуляции происходит увеличение экспрессии генов ксилоглюкан-эндотрансгликозилазы (*XET* или *BRUI*), экспансина A5, α - и β -глюкозидазы [4] и генов кальциевой сигнальной системы *SCA2*, *CAM2*, *CAM3*, *PBP2* (данные не приведены), а этефон это увеличение ингибировал [4]. Активность и содержание транскриптов *BRUI*(*XET*) часто ассоциируется с областями активного роста и стимулируется ростовыми фитогормонами. Ферментативная активность *XET* способствует трансгликозилированию ксилоглюканов, приводящему к модификации клеточной стенки путем расщепления ксилоглюкановых шшивок с микрофибриллами целлюлозы. Стенки клеток становятся менее жесткими и лучше поддаются растяжению в результате снижения количества ксилоглюкановых шшивок. Гемицеллюлозы, особенно ксилоглюканы, выполняют ключевую роль в разрыхлении и стягивании микрофибрилл целлюлозы: они позволяют клетке изменять свою форму в зонах роста и дифференцировки и способствуют сохранению ее формы после растяжения [8]. Обработка растений арабидопсиса 1 мкМ раствором brassinosteroidов приводила к увеличению экспрессии одного из ферментов *XET*. Имеются сведения и о том, что во многих случаях высокий уровень транскрипции гена ксилоглюкан-эндотрансгликозилазы *BRUI* сохраняется и после остановки роста растяжением [7]. Известна важная роль в увеличении растяжимости клеточных стенок белков экспансинов [9]. Значительное участие экспансинов A (*EXPA*) в размягчении клеточной стенки показано для двудольных растений [10]. Показано, что ген экспансина экспрессируется в зоне растяжения корней [11], а также при гравитропическом изгибе во флоэме льна [12]. В кислой среде активируются также глюканазы, которые осуществляют разрыв связей гемицеллюлоз [13].

Таким образом, гравистимуляция вызывает изменения относительного содержания полисахаридов клеточной стенки стебля в зоне гравитропического изгиба. При этом в верхней и нижней половинах стебля происходят преимущественно разнонаправленные изменения, что приводит

в конечном итоге к заметным различиям между двумя частями стебля, что и позволяет ему, по всей вероятности, изгибаться за счет неравномерного роста клеток в разных частях стебля. Эпин не меняет направление изменений, но он ускоряет их. Этилен ингибирует, замедляет эффекты гравистимуляции. Из литературных данных можно сделать вывод о том, что воздействие этилена на растительную клетку может быть двойственным: при низких концентрациях этилен усиливает рост клеток растяжением, в высоких – замедляет [14]. Значительное ингибирование роста клеток растяжением связано с прекращением подкисления клеточных стенок. Предшественник биосинтеза этилена 1-аминоциклопропанкарбоновая кислота способствует уменьшению активности H^+ -АТФаз в плазматической мембране клетки, способствуя подщелачиванию клеточных оболочек [15], также происходит уменьшение экспрессии гена H^+ -АТФазы под воздействием гравистимула и этефона. При ингибирующем воздействии этилена в стенках клетки происходит уменьшение разветвления цепей гемицеллюлоз и возрастание количества водородных связей между гемицеллюлозами и целлюлозой. Происходит образование пектатов кальция, вследствие чего пектины метаксилерируются и переходят из гелеобразной фазы в жесткую [15].

Заключение. Изучено влияние гравистимуляции (поворот растений томата на 90° относительно гравитационного поля Земли) на изменение относительного содержания разных групп полисахаридов в верхней и нижней частях зоны изгиба стеблей томата в период времени 0–24 ч.

Обнаружены изменения процентной доли полисахаридов в зоне изгиба стеблей томата при воздействии одиночного гравитропического стимула и гравистимула и донора экзогенного этилена этефона, гравистимула и эпина.

При воздействии гравистимуляции показано статистически достоверное снижение доли структурных полисахаридов, увеличение растворимых веществ в верхней части стебля и увеличение доли структурных полисахаридов, холоцеллюлозы, α -целлюлозы, снижение растворимых веществ, в нижней части зоны изгиба стебля. Доля содержания лигнина и гемицеллюлоз проявляют тенденцию к снижению. Наиболее выразительные изменения относительного соотношения полисахаридов наблюдались в период времени 3–6 ч воздействия, при этом пик структурных перестроек в зоне изгиба стебля наблюдался через 3 ч.

При предварительной обработке растений эпином изменения относительного содержания полисахаридов происходят в том же направлении, что при действии одиночного гравистимула, но начинают проявляться раньше во времени (с 1 ч воздействия). Обработка растений этефоном замедляет вызванные гравистимуляцией эффекты. Пик основных структурных изменений полисахаридного состава наблюдался через 6 ч воздействия гравистимула и этефона.

Полученные результаты указывают на то, что ответ на гравистимуляцию включает в себя изменение соотношения содержания разных групп полисахаридов, что свидетельствует о важной роли углеводного обмена в восприятии гравитационного воздействия растениями.

Благодарности. Авторы выражают особую благодарность члену-корреспонденту Л. Ф. Кабашниковой за помощь в освоении гравиметрического метода.

Acknowledgements. The authors are very grateful to Corresponding Member L. F. Kabashnikova for help in mastering the gravitational method.

Список использованных источников

1. Olovnikov, A. M. Role of the earth's motions in plant orientation – planetary mechanism / A. M. Olovnikov // *Biochemistry (Moscow)*. – 2021. – Vol. 86, N 11. – P. 1388–1394. <https://doi.org/10.1134/s0006297921110031>
2. Биосинтез целлюлозы: современный взгляд и концепции / В. В. Титок [и др.] // *Тр. Белорусского гос. ун-та*. – 2007. – Т. 2, № 1. – С. 54–64.
3. Ross, J. J. Auxin, gibberellins and the gravitropic response of grass leaf sheath pulvini / J. J. Ross, C. M. Wolbang // *Plant Signal Behav.* – 2008. – Vol. 3, N 1. – P. 74–75. <https://doi.org/10.4161/psb.3.1.4929>
4. Суховеева, С. В. О сопряжении экспрессии генов фосфолипидного, углеводного метаболизма и трансмембранного транспорта растений томата с их реакцией гравитропизма / С. В. Суховеева, Е. М. Кабачевская, И. Д. Волотовский // *Молекулярная и прикладная генетика*. – 2021. – Т. 31. – С. 31–41.
5. Оленников, Д. Н. Методика определения группового состава углеводного комплекса растительных объектов / Д. Н. Оленников, Л. М. Танхаева // *Химия растительного сырья*. – 2006. – № 4. – С. 29–33.

6. Exploring tomato *Solanum pennellii* introgression lines for residual biomass and enzymatic digestibility traits / G. Caruso [et al.] // *BMC Genet.* – 2016. – Vol. 17, N 1. – P. 56. <https://doi.org/10.1186/s12863-016-0362-9>
7. Hayashi, T. Functions of xyloglucan in plant cells / T. Hayashi, R. Kaida // *Molecular Plant.* – 2011. – Vol. 4, N 1. – P. 17–24. <https://doi.org/10.1093/mp/ssq063>
8. Soybean BRU1 encodes a functional xyloglucan endotransglycosylase that is highly expressed in inner epicotyl tissues during brassinosteroid-promoted elongation / M.-H. Oh [et al.] // *Plant Cell Physiol.* – 1998. – Vol. 39, N 1. – P. 124–130. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.pcp.a029283>
9. Cosgrove, D. J. Catalysts of plant cell wall loosening / D. J. Cosgrove // *F1000Research.* – 2016. – Vol. 5. – P. 119. <https://doi.org/10.12688/f1000research.7180.1>
10. Шарова, Е. И. Экспансины – белки, размягчающие клеточные стенки в процессе роста и морфогенеза растений / Е. И. Шарова // *Физиол. растений.* – 2007. – Т. 54, № 6. – С. 805–819.
11. Expression of an expansin gene is correlated with root elongation in soybean / D.-K. Lee [et al.] // *Plant Physiol.* – 2003. – Vol. 131, N 3. – P. 985–997. <https://doi.org/10.1104/pp.009902>
12. Screenplay of flax phloem fiber behavior during gravitropic reaction / N. Mokshina [et al.] // *Plant Signal Behav.* – 2018. – Vol. 13, N 6. – Art. e1486144. <https://doi.org/10.1080/15592324.2018.1486144>
13. Обручева, Н. В. Растяжение клеток как неотъемлемая составляющая роста наземных растений / Н. В. Обручева // *Онтогенез.* – 2008. – Т. 39, № 1. – P. 15–27.
14. Ethylene in vegetative development: a tale with a riddle / F. Vandenbussche [et al.] // *New Phytol.* – 2012. – Vol. 194, N 4. – P. 895–909. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04100.x>
15. Шарова, Е. И. Клеточная стенка растений / Е. И. Шарова. – СПб., 2004. – 156 с.

References

1. Olovnikov A. M. Role of the earth's motions in plant orientation – planetary mechanism. *Biochemistry (Moscow)*, 2021, vol. 86, no. 11, pp. 1388–1394. <https://doi.org/10.1134/s0006297921110031>
2. Titok V. V., Leontiev V. N., Fedorenko I. V., Kubrak S. V., Yurenkova S. I., Grushetskaya Z. E. Cellulose biosynthesis: a modern view and concepts. *Trudy Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta* [Proceedings of the Belarusian State University], 2007, vol. 2, no. 1, pp. 54–64 (in Russian).
3. Ross J. J., Wolbang C. M. Auxin, gibberellins and the gravitropic response of grass leaf sheath pulvini. *Plant Signaling and Behavior*, 2008, vol. 3, no. 1, pp. 74–75. <https://doi.org/10.4161/psb.3.1.4929>
4. Sukhaveeva S. V., Kabachevskaya E. M., Volotovskii I. D. On the coupling of expression of some key genes controlling phospholipid, carbohydrate metabolism and transmembrane transport in tomato plants with their gravitropic reaction. *Molekulyarnaya i prikladnaya genetika* [Molecular and Applied Genetics], 2021, vol. 31, pp. 31–41 (in Russian).
5. Olennikov D. N., Tankhaeva L. M. Method of determining the group composition of the carbohydrate complex of plant objects. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya = Chemistry of Plant Raw Materials*, 2006, no. 4, pp. 29–33 (in Russian).
6. Caruso G., Gomez L. D., Ferriello F., Andolfi A., Borgonuovo C., Evidente A., Simister R., McQueen-Mason S. J., Carpato D., Frusciante L., Ercolano M. R. Exploring tomato *Solanum pennellii* introgression lines for residual biomass and enzymatic digestibility traits. *BMC Genetics*, 2016, vol. 17, no. 1, pp. 56. <https://doi.org/10.1186/s12863-016-0362-9>
7. Hayashi T., Kaida R. Functions of xyloglucan in plant cells. *Molecular Plant*, 2011, vol. 4, no. 1, pp. 17–24. <https://doi.org/10.1093/mp/ssq063>
8. Oh M.-H., Romanow W. G., Smith R. C., Zamski E., Sasse J., Clouse S. D. Soybean BRU1 encodes a functional xyloglucan endotransglycosylase that is highly expressed in inner epicotyl tissues during brassinosteroid-promoted elongation. *Plant and Cell Physiology*, 1998, vol. 39, no. 1, pp. 124–130. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.pcp.a029283>
9. Cosgrove D. J. Catalysts of plant cell wall loosening. *F1000Research*, 2016, vol. 5, p. 119. <https://doi.org/10.12688/f1000research.7180.1>
10. Sharova E. I. Expansins: proteins involved in cell wall softening during plant growth and morphogenesis. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2007, vol. 54, no. 6, pp. 713–727. <https://doi.org/10.1134/s1021443707060015>
11. Lee D.-K., Ahn J. H., Song S.-K., Choi Y. D., Lee J. S. Expression of an Expansin Gene is Correlated with Root Elongation in Soybean. *Plant Physiology*, 2003, vol. 131, no. 3, pp. 985–997. <https://doi.org/10.1104/pp.009902>
12. Mokshina N., Gorshkov O., Ibragimova N., Pozhvanov G., Gorshkova T. Screenplay of flax phloem fiber behavior during gravitropic reaction. *Plant Signal and Behavior*, 2018, vol. 13, no. 6, art. e1486144. <https://doi.org/10.1080/15592324.2018.1486144>
13. Obroucheva N. V. Cell elongation as an inseparable component of growth in terrestrial plants. *Russian Journal of Developmental Biology*, 2008, vol. 39, no. 1, pp. 13–24. <https://doi.org/10.1134/s1062360408010049>
14. Vandenbussche F., Vaseva I., Vissenberg K., Van der Straeten D. Ethylene in vegetative development: a tale with a riddle. *New Phytologist*, 2012, vol. 194, no. 4, pp. 895–909. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04100.x>
15. Sharova E. I. *Cell wall of plants*. Saint Petersburg, 2004. 156 p. (in Russian).

Информация об авторах

Суховеева Светлана Владимировна – науч. сотрудник. Институт биофизики и клеточной инженерии НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: suhoveevalmbc@mail.ru.

Кабачевская Елена Михайловна – канд. биол. наук, заведующий лабораторией. Институт биофизики и клеточной инженерии НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: lmbc@ibp.ogr.by.

Волотовский Игорь Дмитриевич – академик, д-р биол. наук, профессор, гл. науч. сотрудник. Институт биофизики и клеточной инженерии НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: volotovski@yahoo.com.

Information about the authors

Sukhaveyeva Sviatlana V. – Researcher. Institute of Biophysics and Cell Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: suhoveevalmbc@mail.ru.

Kabachevskaya Alena M. – Ph. D. (Biology), Head of the Laboratory. Institute of Biophysics and Cell Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lmbc@ibp.ogr.by.

Volotovskii Igor D. – Academician, D. Sc. (Biology), Professor, Chief Researcher. Institute of Biophysics and Cell Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: volotovski@yahoo.com.

ISSN 1561-8323 (Print)
ISSN 2524-2431 (Online)

УДК 579.222.3
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-3-321-329>

Поступило в редакцию 30.03.2022
Received 30.03.2022

К. В. Кантор, И. А. Проскурнина, Н. В. Сверчкова, академик Э. И. Коломиец

Институт микробиологии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

АНАЛИЗ АНТИМИКРОБНЫХ МЕТАБОЛИТОВ БАКТЕРИЙ *BACILLUS AMYLOLIQUEFACIENS* БИМ В-1125 – ОСНОВЫ БИОПРЕПАРАТА БАКТО-ХЕЛС

Аннотация. Выделены и охарактеризованы антимикробные метаболиты штамма бактерий *B. amyloliquefaciens* БИМ В-1125 – основы пробиотического препарата для профилактики и лечения болезней рыб ценных видов. Установлена экстрацеллюлярная локализация антимикробных соединений; показана их устойчивость в диапазоне температур 50–100 °С и в диапазоне рН 2–10. С помощью тонкослойной хроматографии и жидкостной хроматографии-масс-спектрометрии экспериментально доказана продукция штаммом метаболитов липопептидной природы, относящихся к семейству итурина и сурфактина (итурин А, итурин А4, изомеры итурина А6-А7, сурфактин А, сурфактин С, изомеры сурфактина В).

Ключевые слова: *Bacillus*, пробиотик, антимикробные метаболиты, липопептиды, сурфактин, итурин, тонкослойная хроматография, масс-спектрометрия

Для цитирования. Анализ антимикробных метаболитов бактерий *Bacillus amyloliquefaciens* БИМ В-1125 – основы биопрепарата Бакто-хелс / К. В. Кантор [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2022. – Т. 66, № 3. – С. 321–329. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-3-321-329>

Karina V. Kantor, Irina A. Proskurnina, Natalia V. Sverchkova, Academician Emilia I. Kolomiets

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

ANALYSIS OF ANTIMICROBIAL METABOLITES OF BACTERIA *BACILLUS AMYLOLIQUEFACIENS* BIM B-1125 – THE BASIS OF BACTO-HEALTH BIOLOGICAL PREPARATION

Abstract. Antimicrobial metabolites of bacterial strain *B. amyloliquefaciens* BIM B-1125, the basis of Bacto-health preparation, demonstrating antagonism against the representatives of the opportunistic microbiota of valuable fish species, were isolated and characterized. Extracellular localization of antimicrobial compounds was established; their stability is shown in the temperature range of 50–100 °C and in the pH range of 2–10. The lipopeptide nature of antimicrobial metabolites was shown using thin layer chromatography. The mass spectrometric analysis of the active fraction confirmed the production of lipopeptide metabolites belonging to the iturin and surfactin families (iturin A, iturin A4, iturin A6-A7 isomers, surfactin A, surfactin C, and surfactin B isomers).

Keywords: *Bacillus*, probiotic, antimicrobial metabolites, lipopeptides, surfactin, iturin, thin layer chromatography, mass spectrometry

For citation. Kantor K. V., Proskurnina I. A., Sverchkova N. V., Kolomiets E. I. Analysis of antimicrobial metabolites of bacteria *Bacillus amyloliquefaciens* BIM B-1125 – the basis of Bacto-health biological preparation. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2022, vol. 66, no. 3, pp. 321–329 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-3-321-329>

Введение. В связи с активным развитием промышленного рыбководства в Республике Беларусь остро стоит вопрос о разработке эффективных стратегий борьбы с возбудителями болезней рыб. Традиционным способом лечения и профилактики бактериальных заболеваний в аквакультуре является применение антибиотиков. Однако это приводит к возникновению антибиотикорезистентности у патогенных бактерий и циркуляции генов антибиотикоустойчивости в микробоценозах, что негативно сказывается на окружающей среде и здоровье человека [1]. Экологически приемлемой альтернативой антибиотикам служит использование пробиотических микробных препаратов, характеризующихся высокой биологической активностью и способностью повышать устойчивость организма к заболеваниям различной этиологии. Так, значительный интерес представляют пробиотики на основе бактерий рода *Bacillus* ввиду их технологичности и высокой антимикробной активности, обусловленной продукцией ряда биологически активных соединений [2], которые по механизму синтеза и структуре классифицируются на

рибосомально синтезируемые бактериоцины и продуцируемые при участии нерибосомальных ферментов поликетиды и липопептиды.

Бактериоцины представляют собой синтезируемые рибосомами амфифильные и/или гидрофобные антимикробные пептиды размером от 12 до 50 аминокислотных остатков. Они демонстрируют большое структурное разнообразие и проявляют бактерицидную активность в основном против близкородственных видов [3]; при этом бациллярные бактериоцины (коагулин, тохицин, бациллоцин, амилолизин) обладают более широким спектром действия, чем большинство бактериоцинов молочнокислых бактерий [2]. Механизмы антагонизма этих соединений связаны с их мембранотропностью и заключаются в способности увеличивать проницаемость или вызывать деполяризацию мембран клеток патогена. Некоторые бактериоцины способны, кроме того, подавлять жизнедеятельность клеток, воздействуя на процесс их деления.

Поликети́ды являются одной из самых больших групп бактериальных вторичных метаболитов. Они представляют собой ансамбли из жирных кислот, синтезируемые поликетид-синтазами – нерибосомальными ферментами модульного строения. Для этих соединений характерен широкий спектр биологической активности, в т. ч. антифунгальной. Действие поликетидов на клетки патогенных микроорганизмов разнообразно: так, диффицидин подавляет гены, связанные с синтезом клеточной стенки и репликацией ДНК [4], а макролактин N из *B. subtilis* A29 способен ингибировать пептидеформилазу золотистого стафилококка, что препятствует его способности продуцировать ряд белков [5].

Наиболее изученным классом антимикробных метаболитов бактерий рода *Bacillus* являются липопептиды. Они синтезируются нерибосомально при помощи модульных ферментов пептид-синтаз [6] и состоят из гидрофильной пептидной части (7–10 аминокислотных остатков), связанной с гидрофобным жирным хвостом [7]. Бациллярные липопептиды на основании своего строения относят к трем основным семействам: сурфактины, итурины и фенгицины [8]. Для липопептидов семейства сурфактинов (сурфактин, лихенизин, пумилацидин) характерно наличие сложноэфирной или пептидной связи между β -гидроксижирной кислотой и С-концевой карбоксильной группой аминокислоты. Они содержат 7 аминокислотных остатков, из которых третий и шестой находятся в D-конфигурации [2]. Следует отметить, что аминокислоты и гидроксижирные кислоты в составе этих соединений варьируют как в зависимости от вида и штамма бактерий, так и от условий культивирования. Ввиду того, что сурфактины действуют на липидный бислой различных биологических мембран, они эффективны в отношении широкого круга грамположительных и грамотрицательных бактерий, а также проявляют антифунгальные свойства [7]. Итурины (итурин, бацилломицин, мювенсин, микосубтилин) содержат 7 аминокислотных остатков, из которых второй, третий и шестой всегда находятся в D-конфигурации, и характеризуются наличием сложноэфирной или пептидной связи между жирной кислотой β -NH₂ и С-концевой карбоксильной группой аминокислоты [2]. Пептидная часть данных соединений также демонстрирует высокий полиморфизм, приводящий к различным биологическим и физиолого-биохимическим свойствам; при этом антибактериальное действие итуринов весьма ограничено [7]. Соединения семейства фенгицинов (фенгицин, плипастатин) имеют сложноэфирную или пептидную связь между β -ОН жирной кислотой и С-концевой карбоксильной группой аминокислоты и содержат 10 аминокислотных остатков, из которых второй, четвертый, шестой и девятый находятся в D-конфигурации [2]. Эти соединения чаще всего действуют специфически против мицелиальных грибов [7].

Следует отметить, что ряд исследований демонстрирует перспективность применения именно бациллярных липопептидов для профилактики и лечения болезней рыб в аквакультуре [9], связанную, в том числе, со способностью этих соединений ингибировать рост полирезистентных патогенов. Так, показано, что изоформы сурфактина *B. amyloliquefaciens* M1 проявляют антимикробную активность в отношении штаммов *Vibrio anguillarum* [10] со множественной антибиотикорезистентностью, а липопептиды *Bacillus* sp. 176 подавляют рост *V. alginolyticus* [1].

Цель работы – выделение и характеристика антимикробных метаболитов, продуцируемых штаммом бактерий *B. amyloliquefaciens* БИМ В-1125 – основой биопрепарата для профилактики и лечения бактериальных болезней ценных видов рыб.

Материалы и методы исследования. Объектом исследования служили антимикробные метаболиты штамма *B. amyloliquefaciens* БИМ В-1125, демонстрирующего высокую степень антагонизма в отношении возбудителей болезней ценных видов рыб [11]. В качестве тест-объекта использовали культуру бактерий *Aeromonas hydrophyla* 51, изолированную из селезенки сеголетка пораженной аэромонозом стерляди.

Глубинное культивирование исследуемого штамма проводили на среде Мейнелла в колбах на шейкере-инкубаторе со скоростью перемешивания 200 ± 20 об/мин при температуре $30\text{ }^\circ\text{C}$, инкубацию тест-объекта – в аналогичных условиях на мясо-пептонном бульоне.

Антагонистическую активность во всех представленных опытах оценивали методом отсроченного антагонизма. Для исследования использовали ночную культуру тест-объекта, соответствующую по оптической плотности стандарту мутности Тарасевича № 10. Локализацию антимикробных метаболитов устанавливали посредством оценки антагонистической активности клеточной фракции, гомогената клеток и бесклеточной культуральной жидкости (КЖ). Клеточную фракцию получали путем центрифугирования КЖ (10 000 об/мин, 15 мин) и последующего ресуспензирования осадка в калий-фосфатном буфере до начального объема. Для получения гомогената клетки разрушали ультразвуком с использованием дезинтегратора. Бесклеточная культуральная жидкость была получена при пропускании супернатанта через мембранный фильтр из полиэфирсульфона с диаметром пор 0,2 мкм.

Устойчивость антимикробных метаболитов к действию различных рН оценивали в диапазоне рН 2–12 согласно [12]. Для исследования устойчивости антимикробных метаболитов к температурным воздействиям бесклеточную КЖ выдерживали в течение 5, 15 и 30 мин при 50, 60, 70, 80, 90 и $100\text{ }^\circ\text{C}$, после чего все образцы охлаждали до комнатной температуры и оценивали уровень их антагонистической активности [13].

Выделение антимикробных метаболитов осуществляли посредством их экстракции из бесклеточной культуральной жидкости гидрофобными (бензол, хлороформ, бутанол) и гидрофильными (метанол, этанол, изопропанол) растворителями (соотношение растворителя к КЖ составляло 1 : 1). При использовании гидрофильных растворителей бесклеточную КЖ предварительно выпаривали на роторном испарителе, затем проводили экстракцию в течение 12 ч. Экстракцию метаболитов гидрофобными соединениями проводили в делительных воронках. Разделение смеси выделенных метаболитов проводили методом тонкослойной хроматографии с использованием пластинок «Silufol UV-254» при восходящем потоке элюента в экспериментально подобранной системе *n*-бутанол : уксусная кислота : вода (4 : 1 : 1). Антибактериальную активность полученных фракций тестировали методом биоавтографии. Характеристику химического состава полученных фракций давали после обработки пластинок дистиллированной водой и нингидрином [12].

Для идентификации соединений класса липопептидов экстракт активной фракции и стандарты липопептидов (сурфактин и итурин из *B. subtilis*, Sigma-Aldrich) наносили на пластинки силикагель 60 и проводили тонкослойную хроматографию (ТСХ) при восходящем потоке элюента в системе хлороформ : метанол : вода (8 : 1 : 1) согласно [14; 15].

Масс-спектрометрический анализ содержания липопептидов в экстракте проводили методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) на хроматографе Agilent 1200 с масс-селективным детектором типа тройной квадруполь Agilent 6410 и диодно-матричным детектором. Разделение компонентов осуществляли на колонке Agilent Zorbax Eclipse Plus C18 длиной 100 мм с размером частиц 1,8 мкм. Анализ проводили в режиме градиентного элюирования, в качестве подвижной фазы использовали 0,05 %-ный водный раствор муравьиной кислоты в деионизированной воде (раствор А) и 0,05 %-ный раствор муравьиной кислоты в ацетонитриле (раствор В). Линейный градиент включал от 25 до 95 % фазы В за 15 мин, время анализа – 26 мин. Объем инъекции составлял 5 мкл, скорость потока – 0,3 мл/мин. Для построения калибровочной кривой использовали растворы коммерческих стандартов итурина и сурфактина (Sigma-Aldrich) в ацетонитриле в диапазоне концентраций от 25 до 100 мкг/мл. Обсчет образцов проводили по хроматограммам с масс-детектора и УФ-детектора ($\lambda = 195$ нм).

Результаты и их обсуждение. При установлении локализации антимикробных метаболитов штамма показано, что бесклеточная культуральная жидкость, полученная путем фильтрации супернатанта через мембрану из полиэфирсульфона с диаметром пор 0,2 мкм, подавляет рост *A. hydrophyla* 51 в той же мере, что и культуральная жидкость, тогда как клеточная фракция и гомогенат клеток демонстрируют только остаточную антагонистическую активность (табл. 1).

Т а б л и ц а 1. Антагонистическая активность культуральной жидкости штамма бактерий *B. amyloliquefaciens* БИМ В-1125 и ее фракций

Table 1. Antagonistic activity of the culture liquid of the bacterial strain *B. amyloliquefaciens* BIM B-1125 and its fractions

Фракции КЖ Culture fluid fractions	Диаметр зоны подавления роста <i>A. hydrophyla</i> 51, мм Inhibition zone diameter <i>A. hydrophyla</i> 51, mm
Бесклеточная КЖ	32 ± 0,3
Клеточная фракция	12 ± 0,5
Гомогенат клеток	10 ± 0,3
КЖ	33 ± 0,5

На основании полученных данных сделан вывод об экстрацеллюлярной локализации антимикробных метаболитов, вследствие чего для дальнейших исследований выбрана бесклеточная фракция КЖ штамма.

При исследовании чувствительности антимикробных метаболитов к действию pH и температуры установлено, что антагонистическая активность выбранной фракции остается неизменной в диапазоне температур 50–100 °С и в диапазоне pH 2–10, тогда как при pH 11–12 ее уровень незначительно снижается (на 9–11 %), что свидетельствует о частичной инактивации продуцируемых соединений в щелочной среде (табл. 2).

Т а б л и ц а 2. Устойчивость антимикробных метаболитов штамма бактерий *B. amyloliquefaciens* БИМ В-1125 к воздействию высоких температур и различного уровня pH

Table 2. Tolerance of antimicrobial metabolites of the *B. amyloliquefaciens* BIM B-1125 to high temperatures and different pH levels

Условия инкубации бесклеточной культуральной жидкости Conditions for incubation of cell-free culture fluid	Диаметр зоны подавления роста <i>A. hydrophyla</i> 51, мм Inhibition zone diameter <i>A. hydrophyla</i> 51, mm
25 °С, 5 мин (контроль)	32 ± 0,3
50 °С, 5 мин	32 ± 0,2
60 °С, 5 мин	31 ± 0,6
70 °С, 5 мин	32 ± 0,4
80 °С, 5 мин	30 ± 0,5
90 °С, 5 мин	31 ± 0,3
100 °С, 5 мин	30 ± 0,6
25 °С, 15 мин (контроль)	32 ± 0,3
50 °С, 15 мин	31 ± 0,2
60 °С, 15 мин	32 ± 0,4
70 °С, 15 мин	32 ± 0,1
80 °С, 15 мин	30 ± 0,4
90 °С, 15 мин	31 ± 0,3
100 °С, 15 мин	31 ± 0,5
25 °С, 30 мин (контроль)	32 ± 0,3
50 °С, 30 мин	32 ± 0,5
60 °С, 30 мин	31 ± 0,4
70 °С, 30 мин	33 ± 0,2
80 °С, 30 мин	30 ± 0,5
90 °С, 30 мин	31 ± 0,4
100 °С, 30 мин	30 ± 0,4
pH 2	30 ± 0,4

Окончание табл. 2

Условия инкубации бесклеточной культуральной жидкости Conditions for incubation of cell-free culture fluid	Диаметр зоны подавления роста <i>A. hydrophyla</i> 51, мм Inhibition zone diameter <i>A. hydrophyla</i> 51, mm
pH 3	30 ± 0,5
pH 4	32 ± 0,2
pH 5	31 ± 0,6
pH 6	32 ± 0,5
pH 7 (контроль)	32 ± 0,3
pH 8	31 ± 0,5
pH 9	30 ± 0,2
pH 10	30 ± 0,3
pH 11	27 ± 0,2
pH 12	26 ± 0,7

Высокий уровень резистентности антимикробных экзо-метаболитов изучаемого штамма к действию pH и температуры позволяет сделать предположение о липопептидной природе данных веществ, так как согласно литературным данным [7] липопептиды бактерий рода *Bacillus* характеризуются устойчивостью к воздействию различных физико-химических факторов за счет своей циклической структуры и наличия в ней нетипичных элементов, таких как D-аминокислоты.

При выборе оптимального экстрагента для антимикробных метаболитов установлено, что из всех использованных в опыте соединений самая высокая экстрагирующая способность характерна для метанола (зона лизиса – 30 ± 0,2 мм), тогда как степень экстракции другими испытанными растворителями ниже (этанол – 26 ± 0,4 мм, изопропанол – 23 ± 0,4 мм, бутанол – 26 ± 0,5 мм) или отсутствует (бензол и хлороформ). Антимикробное действие метанольного экстракта сопоставимо с таковым для супернатанта культуральной жидкости штамма (рис. 1).

При визуализации хроматограммы метанольного экстракта бесклеточной КЖ (при УФ 254 нм), полученной методом ТСХ в системе *n*-бутанол : уксусная кислота : вода (4 : 1 : 1), зафиксировано 6 фракций. Методом биоавтографии выявлена активная фракция с Rf 0,34, характеризующаяся высоким антагонистическим действием (зона лизиса на газоне

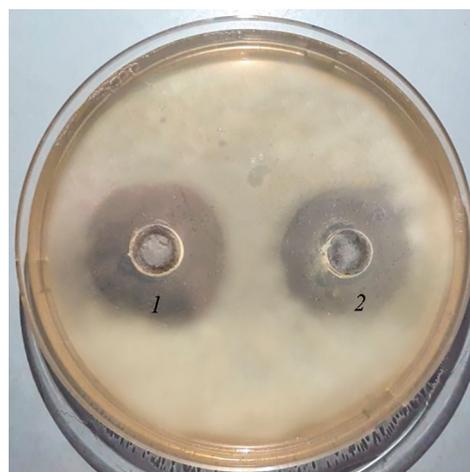


Рис. 1. Антагонистическое действие бесклеточной культуральной жидкости (1) и метанольного экстракта бесклеточной культуральной жидкости (2) штамма бактерий *B. amyloliquefaciens* БИМ В-1125

Fig. 1. Antagonistic effect of cell-free culture fluid (1) and methanolic extract of cell-free culture fluid (2) of the bacterial strain *B. amyloliquefaciens* BИМ В-1125

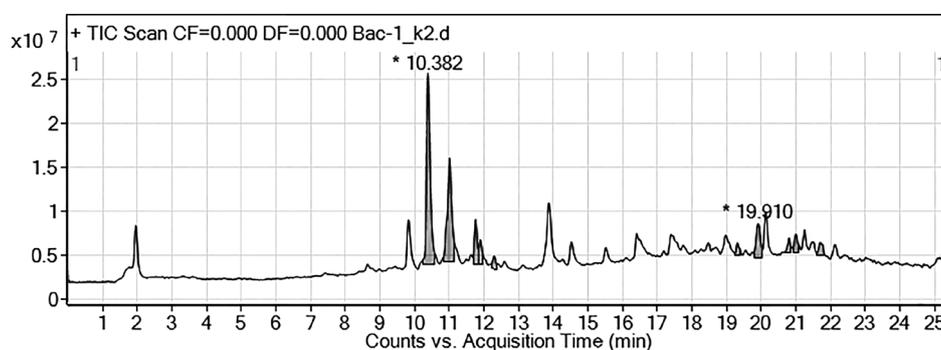


Рис. 2. Хроматограмма липопептидов, продуцируемых штаммом *B. amyloliquefaciens* БИМ В-1125 (метанольный экстракт)

Fig. 2. The chromatogram of lipopeptides produced by the strain *B. amyloliquefaciens* BИМ В-1125 (methanolic extract)

Т а б л и ц а 3. Концентрация липопептидов в метанольном экстракте культуральной жидкости штамма *B. amyloliquefaciens* БИМ В-1125

Table 3. The concentration of lipopeptides in the methanolic extract of the culture liquid of the strain *B. amyloliquefaciens* BIM B-1125

Семейство липопептидов Lipopeptide family	Масса/заряд Weight/charge	Изоформа Isoform	Время удержания, мин Holding time, min	Концентрация, мкг/мл* Concentration, µg/ml
Итурин	1043,2	Итурин А	10,382	36,83
	1057,2	Итурин А4	11,010	23,67
	1071,2	Итурин А6-А7	11,762; 11,896	9,69
Сурфактин	1008,3	Сурфактин А (С13)	19,900	11,23
	1022,3	Сурфактин В (С14)	20,806; 21,001	5,55
	1036,3	Сурфактин С (С15)	21,722	1,90

Примечание: * – для изомеров указана суммарная концентрация.

Note: * – for isomers, the total concentration is indicated.

A. hydrophyla 51 – 25 ± 0,2 мм). При обработке данного пятна на хроматографической пластинке нингидрином зафиксировано появление окраски, что свидетельствует о наличии аминокислот и пептидов в ее составе; обработка дистиллированной водой выявила наличие метаболитов с поверхностно-активными свойствами. На амфифильность антимикробных метаболитов указы-

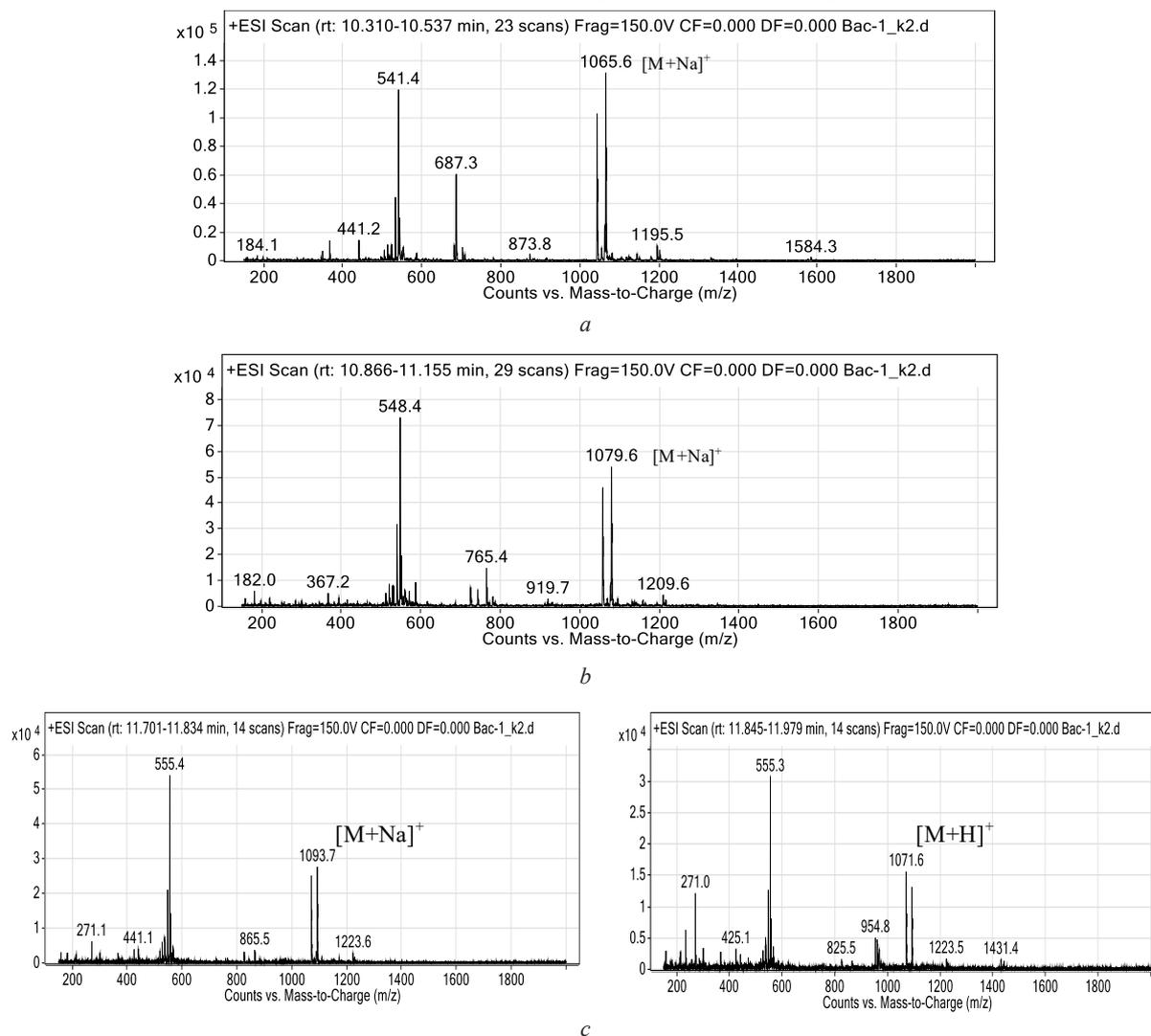


Рис. 3. Масс-спектры содержащихся в метанольном экстракте культуральной жидкости штамма *B. amyloliquefaciens* БИМ В-1125 итурина А (а), итурина А4 (б) и гомологов итурина А6-А7 (с)

Fig. 3. The LC-MS spectrum contained in the methanolic extract of the culture liquid of the strain *B. amyloliquefaciens* BIM B-1125 of iturin A (a), iturin A4 (b) and iturin A6-A7 (c)

вает также их низкая степень экстракции неполярными соединениями (бензол, хлороформ) [16]. Исходя из представленных выше данных, можно сделать предположение о наличии в активной фракции соединений класса липопептидов.

Для идентификации соединений класса липопептидов экстракт активной фракции и коммерческие стандарты сурфактина и итурина (Sigma Aldrich) наносили на пластинки силикагель 60 и проводили ТСХ при восходящем потоке элюента в системе хлороформ : метанол : вода (8 : 1 : 1). При визуализации хроматограммы в УФ свете (254 нм) были зафиксированы пятна с Rf 0,3 и 0,7 для стандартов сурфактина и итурина соответственно и пятна с Rf 0,33 и 0,71 для исследуемой метанольной фракции, что свидетельствует о продукции штаммом *B. amyloliquefaciens* БИМ В-1125 липопептидов семейства сурфактина и итурина.

Масс-спектрометрический анализ метанольного экстракта бесклеточной культуральной жидкости подтвердил наличие в нем липопептидов семейств итурина и сурфактина (время удержания в промежутках 10–12 и 19–22 мин соответственно) (рис. 2).

Согласно полученным данным, в исследуемом образце достоверно обнаружены липопептиды итурин А, итурин А4 (концентрация 36,83 и 23,67 мкг/мл), изомеры итурина А6-А7 (6,17 и 3,52 мкг/мл), а также сурфактин А (11,23 мкг/мл), сурфактин С (1,9 мкг/мл) и изомеры сурфактина В (2,36 и 3,19 мкг/мл) (табл. 3). Детектированы протонированные молекулярные

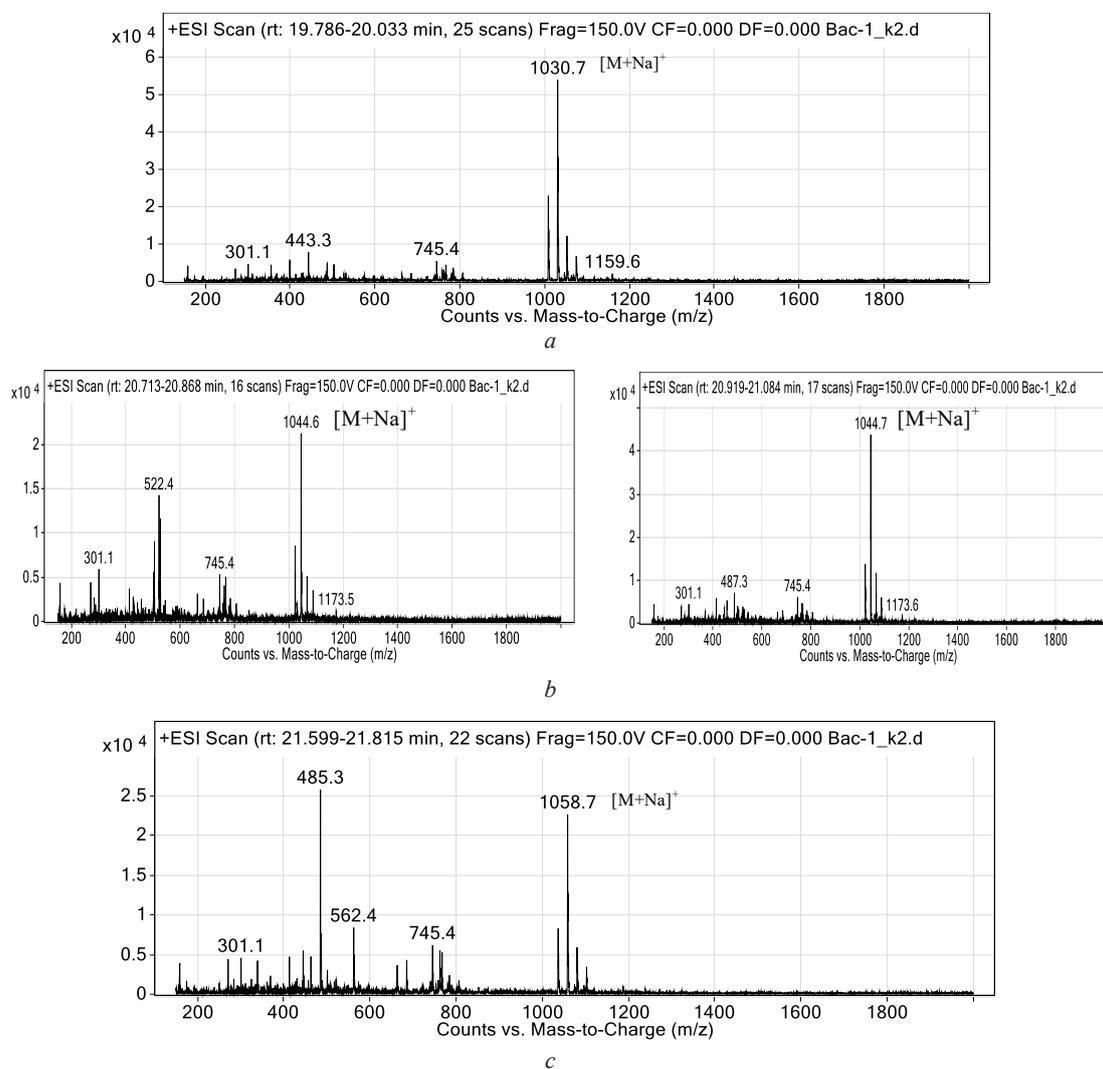


Рис. 4. Масс-спектры содержащихся в метанольном экстракте культуральной жидкости штамма *B. amyloliquefaciens* БИМ В-1125 сурфактина А (С13) (а), гомологов сурфактина В (С14) (б) и сурфактина С (С15) (с)

Fig. 4. The LC-MS spectrum contained in the methanolic extract of the culture liquid of the strain *B. amyloliquefaciens* BIM В-1125 of surfactin А (С13) (а), surfactin В (С14) (б) and surfactin С (С15) (с)

ионы $[M + H]^+$ и аддукты $[M + Na]^+$ липопептидов семейств итурина и сурфактина. Хроматограммы и масс-спектры обнаруженных соединений отображены на рис. 3, 4.

Заключение. Выделены и охарактеризованы антимикробные метаболиты штамма бактерий *B. amyloliquefaciens* БИМ В-1125. Показана экстрацеллюлярная локализация антимикробных метаболитов, а также их термостабильность в диапазоне температур 50–100 °С и устойчивость к низким значениям рН. Подтверждена липопептидная природа фракций, демонстрирующих антагонизм в отношении *A. hydrophyla* 51. С помощью жидкостной хроматографии-масс-спектрометрии экспериментально доказано наличие в метанольном экстракте бесклеточной КЖ, проявляющем антимикробную активность, липопептидов семейств итурина и сурфактина (итурин А, итурин А4, изомеры итурина А6-А7, сурфактин А, сурфактин С, изомеры сурфактина В). Липопептидная природа антимикробных метаболитов обеспечивает высокую конкурентоспособность биопрепарата Бакто-хелс в аквабиоценозах.

Список использованных источников

1. Isolation and characterization of cyclic lipopeptides with broad-spectrum antimicrobial activity from *Bacillus siamensis* JFL15 / Ben-Hong Xu [et al.] // 3 Biotech. – 2018. – Vol. 8, N 10. <https://doi.org/10.1007/s13205-018-1443-4>
2. Antimicrobial peptides of the genus *Bacillus*: a new era for antibiotics / C. D. Sumi [et al.] // Can. J. Microbiol. – 2015. – Vol. 61, N 2. – P. 93–103. <https://doi.org/10.1139/cjm-2014-0613>
3. Isolation of the *Bacillus subtilis* antimicrobial peptide subtilisin from the dairy product-derived *Bacillus amyloliquefaciens* / K. E. Sutyak [et al.] // J. Applied Microbiol. – 2008. – Vol. 104, N 4. – P. 1067–1074. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2007.03626.x>
4. Antimicrobial *Bacillus*: metabolites and their mode of action / C. Tran [et al.] // Antibiotics. – 2022. – Vol. 11, N 1. – P. 88. <https://doi.org/10.3390/antibiotics11010088>
5. Macrolactin N, a new peptide deformylase inhibitor produced by *Bacillus subtilis* / J. S. Yoo [et al.] // Bioorg. Med. Chem. Lett. – 2006. – Vol. 16, N 18. – P. 4889–4892. <https://doi.org/10.1016/j.bmcl.2006.06.058>
6. Bacillaceae-derived peptide antibiotics since 2000 / P. Zhao [et al.] // Peptides. – 2018. – Vol. 101. – P. 10–16. <https://doi.org/10.1016/j.peptides.2017.12.018>
7. Lesson from Ecotoxicity: Revisiting the Microbial Lipopeptides for the Management of Emerging Diseases for Crop Protection / D. Malviya [et al.] // Int. J. Environ. Res. Public Health. – 2020. – Vol. 17, N 4. – P. 1434. <https://doi.org/10.3390/ijerph17041434>
8. Identification of lipopeptides in *Bacillus megaterium* by two-step ultrafiltration and LC-ESI-MS/MC / Y. Ma [et al.] // AMB Express. – 2016. – Vol. 6, N 1. – P. 79. <https://doi.org/10.1186/s13568-016-0252-6>
9. Characterization and mechanism of anti-*Aeromonas salmonicida* activity of a marine probiotic strain, *Bacillus velezensis* V4 / X.-Y. Gao [et al.] // Appl. Microbiol. and Biotechnol. – 2017. – Vol. 101, N 9. – P. 3759–3768. <https://doi.org/10.1007/s00253-017-8095-x>
10. Antibacterial activity of the lipopeptides produced by *Bacillus amyloliquefaciens* M1 against multidrug-resistant *Vibrio* spp. isolated from diseased marine animals / H. M. Xu [et al.] // Appl. Microbiol. Biotechnol. – 2014. – Vol. 98, N 1. – P. 127–136. <https://doi.org/10.1007/s00253-013-5291-1>
11. Ферментативная активность штамма *Bacillus amyloliquefaciens* БИМ В-1125 – антагониста патогенной микрофлоры ценных видов рыб / К. В. Кантор [и др.] // Биотехнологии микроорганизмов: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, БГУ, 27–29 нояб. 2019 г. – Минск, 2019. – С. 74–77.
12. A Broad-Spectrum Antimicrobial Activity of *Bacillus subtilis* RLID 12.1 / R. Ramachandran [et al.] // Scientific World Journal. – 2014. – Vol. 2014. – 10 p. <https://doi.org/10.1155/2014/968487>
13. Purification and Characterization of a Bacteriocin, BacBS2, produced by *Bacillus velezensis* BS2 isolated from Meongge Jeotgal / V. Perumal [et al.] // J. Microbiol. Biotechnol. – 2019. – Vol. 29, N 7. – P. 1033–1042. <https://doi.org/10.4014/jmb.1903.03065>
14. Production and characterization of surfactin-like biosurfactant by novel strain *Bacillus nealsonii* S2MT and its potential for oil contaminated soil remediation / I. A. Phulpoto [et al.] // Microbial. Cell Factories. – 2020. – Vol. 19, N 1. – Art. 145. <https://doi.org/10.1186/s12934-020-01402-4>
15. Biological control of peach brown rot (*Monilinia* spp.) by *Bacillus subtilis* CPA-8 is based on production of fengycin-like lipopeptides / V. Yanez-Mendizabal [et al.] // Eur. J. Plant. Pathol. – 2012. – Vol. 132, N 4. – P. 609–619. <https://doi.org/10.1007/s10658-011-9905-0>
16. Выделение и предварительная характеристика антигрибных соединений штамма *Bacillus subtilis* ИБ-54 – антагониста почвенных микромицетов / А. И. Мелентьев [и др.] // Тр. БГУ. – 2010. – Т. 5, ч. 1. – С. 200–209.

References

1. Ben-Hong Xu, Zhi-Wei Ye, Qian-Wang Zheng, Tao Wei, Jun-Fang Lin, Li-Qiong Guo. Isolation and characterization of cyclic lipopeptides with broad-spectrum antimicrobial activity from *Bacillus siamensis* JFL15. 3 Biotech, 2018, vol. 8, no. 10. <https://doi.org/10.1007/s13205-018-1443-4>

2. Sumi C. D., Yang B. W., Yeo I.-C., Hahm Y. T. Antimicrobial peptides of the genus *Bacillus*: a new era for antibiotics. *Canadian Journal of Microbiology*, 2015, vol. 61, no. 2, pp. 93–103. <https://doi.org/10.1139/cjm-2014-0613>
3. Sutyak K. E., Wirawan R. E., Aroucheva A. A., Chikindas M. L. Isolation of the *Bacillus subtilis* antimicrobial peptide subtilisin from the dairy product-derived *Bacillus amyloliquefaciens*. *Journal of Applied Microbiology*, 2008, vol. 104, no. 4, pp. 1067–1074. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2007.03626.x>
4. Tran C., Cock I. E., Chen X., Feng Y. Antimicrobial *Bacillus*: metabolites and their mode of action. *Antibiotics*, 2022, vol. 11, no. 1, p. 88. <https://doi.org/10.3390/antibiotics11010088>
5. Yoo J.-S., Zheng C.-J., Lee S., Kwak J.-H., Kim W.-G. Macrolactin N, a new peptide deformylase inhibitor produced by *Bacillus subtilis*. *Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters*, 2006, vol. 16, no. 18, pp. 4889–4892. <https://doi.org/10.1016/j.bmcl.2006.06.058>
6. Zhao P., Xue Y., Gao W., Li J., Zu X., Fu D., Bai X., Zuo Y., Hu Z., Zhang F. Bacillaceae-derived peptide antibiotics since 2000. *Peptides*, 2018, vol. 101, pp. 10–16. <https://doi.org/10.1016/j.peptides.2017.12.018>
7. Malviya D., Sahu P. K., Singh U. B., Paul S., Gupta A., Gupta A. R., Singh S., Kumar M., Paul D., Rai J. P., Singh H. V., Brahmprakash G. P. Lesson from Ecotoxicity: Revisiting the Microbial Lipopeptides for the Management of Emerging Diseases for Crop Protection. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, vol. 17, no. 4, p. 1434. <https://doi.org/10.3390/ijerph17041434>
8. Ma Y., Kong Q., Qin C., Chen Y., Lv R., Zhou G. Identification of lipopeptides in *Bacillus megaterium* by two-step ultrafiltration and LC-ESI-MS/MS. *AMB Express*, 2016, vol. 6, no. 1, p. 79. <https://doi.org/10.1186/s13568-016-0252-6>
9. Gao X.-Y., Liu Y., Miao L.-L., Li E.-W., Sun G., Liu Y., Liu Z.-P. Characterization and mechanism of anti-*Aeromonas salmonicida* activity of a marine probiotic strain, *Bacillus velezensis* V4. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2017, vol. 101, no. 9, pp. 3759–3768. <https://doi.org/10.1007/s00253-017-8095-x>
10. Xu H.-M., Rong Y.-J., Zhao M.-X., Song B., Chi Z.-M. Antibacterial activity of the lipopeptides produced by *Bacillus amyloliquefaciens* M1 against multidrug-resistant *Vibrio* spp. isolated from diseased marine animals. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2014, vol. 98, no. 1, pp. 127–136. <https://doi.org/10.1007/s00253-013-5291-1>
11. Kantor K. V., Proskurnina I. A., Sverchkova N. V., Romanovskaya T. V., Kolomiets E. I. Enzymatic activity of the strain *Bacillus amyloliquefaciens* BIM B-1125 – an antagonist of pathogenic microflora of valuable fish species. *Biotehnologii mikroorganizmov: Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Biotechnologies of microorganisms: Materials of the International Scientific-Practical Conference]. Minsk, 2019, pp. 74–77 (in Russian).
12. Ramachandran R., Chalasani A. G., Lal R., Roy U. A Broad-Spectrum Antimicrobial Activity of *Bacillus subtilis* RLID 12.1. *Scientific World Journal*, 2014, vol. 2014, 10 p. <https://doi.org/10.1155/2014/968487>
13. Perumal V., Yao Z., Kim J. A., Kim H. J., Kim J. H. Purification and Characterization of a Bacteriocin, BacBS2, produced by *Bacillus velezensis* BS2 isolated from Meongge Jeotgal. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2019, vol. 29, no. 7, pp. 1033–1042. <https://doi.org/10.4014/jmb.1903.03065>
14. Phulpoto I. A., Yu Z., Hu B., Wang Y., Ndayisenga F., Li J., Liang H., Qazi M. A. Production and characterization of surfactin-like biosurfactant by novel strain *Bacillus nealsonii* S2MT and its potential for oil contaminated soil remediation. *Microbial Cell Factories*, 2020, vol. 19, no. 1, art. 145. <https://doi.org/10.1186/s12934-020-01402-4>
15. Yáñez-Mendizábal V., Zerriouh H., Viñas R., Torres R., Usall J., de Vicente A., Pérez-García A., Teixidó N. Biological control of peach brown rot (*Monilinia* spp.) by *Bacillus subtilis* CPA-8 is based on production of fengycin-like lipopeptides. *European Journal of Plant Pathology*, 2012, vol. 132, no. 4, p. 609–619. <https://doi.org/10.1007/s10658-011-9905-0>
16. Melent'ev A. I., Kurchenko V. P., Leont'ev V. N., Galimzjanova N. F., Kuz'mina L. Ju., Gilvanova E. A., Usanov N. G., Boiko T. F., Semenova E. A., Aktuganov G. E. Isolation and preliminary characterization of antifungal compounds of *Bacillus subtilis* strain IB-54, an antagonist of soil micromycetes. *Trudy BGU* [Proceedings of BSU], 2010, vol. 5, no. 1, pp. 200–209 (in Russian).

Информация об авторах

Кантор Карина Викторовна – науч. сотрудник. Институт микробиологии НАН Беларуси (ул. Купревича, 2, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: kantorkarina@rambler.ru.

Проскурнина Ирина Александровна – заведующий сектором. Институт микробиологии НАН Беларуси (ул. Купревича, 2, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: irina_pros@tut.by.

Сверчкова Наталья Владимировна – канд. биол. наук, вед. науч. сотрудник. Институт микробиологии НАН Беларуси (ул. Купревича, 2, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: sverchkova@mbio.bas-net.by.

Коломиец Эмилия Ивановна – академик, д-р биол. наук, профессор, гл. науч. сотрудник. Институт микробиологии НАН Беларуси (ул. Купревича, 2, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: kolomiets@mbio.bas-net.by.

Information about the authors

Kantor Karina V. – Researcher. Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus (2, Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kantorkarina@rambler.ru.

Proskurnina Irina A. – Head of the Sector. Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus (2, Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: irina_pros@tut.by.

Sverchkova Natalia V. – Ph. D. (Biology), Leading Researcher. Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus (2, Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sverchkova@mbio.bas-net.by.

Kolomiets Emilia I. – Academician, D. Sc. (Biology), Professor, Chief Researcher. Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus (2, Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kolomiets@mbio.bas-net.by.

МЕДИЦИНА**MEDICINE**

УДК 616.94-07:576.53.08:[611.018.5+611.018.83]
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-3-330-337>

Поступило в редакцию 31.03.2022

Received 31.03.2022

Академик Л. П. Титов¹, М. О. Трусевич¹, Ю. Л. Горбич²

¹Республиканский научно-практический центр эпидемиологии и микробиологии,
Минск, Республика Беларусь

²Белорусская медицинская академия последипломного образования, Минск, Республика Беларусь

**РОЛЬ КЛЕТОК СИСТЕМЫ МОНОНУКЛЕАРНЫХ ФАГОЦИТОВ
И РЕГУЛЯТОРНЫХ Т-ЛИМФОЦИТОВ
В ФОРМИРОВАНИИ СОСТОЯНИЯ ИММУНОСУПРЕССИИ ПРИ СЕПСИСЕ**

Аннотация. Изучено изменение относительного и абсолютного содержания в крови пациентов с сепсисом и септическим шоком субпопуляций моноцитов, дендритных клеток, миелоидных супрессорных клеток, регуляторных Т-лимфоцитов на 3–4 день от постановки диагноза с целью оценки формирования стадии иммуносупрессии. Обследовано 33 пациента с сепсисом (19 мужчин и 14 женщин, возраст $57,1 \pm 19,9$ лет) и 6 пациентов с септическим шоком (2 мужчин и 4 женщины, возраст $49,3 \pm 19,6$ лет). Контрольная группа включала 30 здоровых доноров. Субпопуляции моноцитов, дендритных клеток, миелоидных супрессорных клеток и T_{reg} -клеток определяли методом проточной цитометрии. Выявлено достоверное снижение экспрессии HLA-DR на моноцитах, снижение относительного содержания классических моноцитов, миелоидных и плазматоидных дендритных клеток, увеличение процентного содержания промежуточных моноцитов и Γ -МЛСК $CD15^+$, увеличение абсолютного содержания T_{reg} -клеток у пациентов с сепсисом и септическим шоком. Выявленные функциональные дефекты и сдвиги в составе популяции лейкоцитов указывают на развитие стадии иммуносупрессии у пациентов с сепсисом.

Ключевые слова: моноциты, дендритные клетки, миелоидные супрессорные клетки, T_{reg} -клетки, сепсис, септический шок

Для цитирования. Титов, Л. П. Роль клеток системы мононуклеарных фагоцитов и регуляторных Т-лимфоцитов в формировании состояния иммуносупрессии при сепсисе / Л. П. Титов, М. О. Трусевич, Ю. Л. Горбич // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2022. – Т. 66, № 3. – С. 330–337. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-3-330-337>

Academician Leonid P. Titov¹, Margarita O. Trusevich¹, Yury L. Gorbich²

¹Republican Research and Practical Center for Epidemiology and Microbiology, Minsk, Republic of Belarus

²Belarusian Medical Academy of Postgraduate Education, Minsk, Republic of Belarus

**ROLE OF THE CELLS OF THE SYSTEM OF MONONUCLEAR PHAGOCYTES AND REGULATORY
T-LYMPHOCYTES IN THE FORMATION OF THE STATE OF IMMUNOSUPPRESSION IN SEPSIS**

Abstract. Sepsis still represents one of the leading causes of death in hospitalized patients worldwide, and its incidence is increasing. Changes in the relative and absolute blood levels of monocytes, dendritic cells, myeloid suppressor cells, and regulatory T-lymphocytes in the blood of patients with sepsis and septic shock were studied on the 3rd–4th day after diagnosis in order to identify the stage of immunosuppression. 33 patients with sepsis (19 men and 14 women, age 57.1 ± 19.9 years) and 6 patients with septic shock (2 men and 4 women, age 49.3 ± 19.6 years) were examined. The control group included 30 healthy donors. Subpopulations of monocytes, dendritic cells, myeloid suppressor cells, and T_{reg} cells were determined by flow cytometry. A significant decrease in HLA-DR expression on monocytes, a decrease in the relative content of classical monocytes, myeloid and plasmacytoid dendritic cells, an increase in the percentage of intermediate monocytes and G-MLSC $CD15^+$, an increase in the absolute content of T_{reg} cells in patients with sepsis and septic shock were revealed. The revealed functional defects and shifts in the composition of the leukocyte population indicate the development of the stage of immunosuppression in patients with sepsis.

Keywords: monocytes, dendritic cells, myeloid suppressor cells, T_{reg} cells, sepsis, septic shock

For citation. Titov L. P., Trusevich M. O., Gorbich Y. L. Role of the cells of the system of mononuclear phagocytes and regulatory T-lymphocytes in the formation of the state of immunosuppression in sepsis. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2022, vol. 66, no. 3, pp. 330–337 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-3-330-337>

Введение. Сепсис – синдром дисрегуляции защитных механизмов индивидуума, индуцированный внедрением бактерий, приводящий к системному воспалению, повреждению тканей, дисфункции жизненно важных органов, и является основной причиной заболеваемости и смертности пациентов отделений хирургии и интенсивной терапии [1]. В мире ежегодно регистрируется более 19,0 млн случаев тяжелого течения сепсиса и около 5,0 млн случаев смертей, ассоциированных с ним. В странах западной Европы заболеваемость сепсисом составляет 50–100 случаев на 100 000 населения. В Республике Беларусь предполагается до 2,5 тыс. больных сепсисом. Ежегодно сепсисом страдает более 3 млн новорожденных и 1,2 млн детей, при этом умирает 1 млн новорожденных. Три из девяти случаев смерти от неонатального сепсиса предположительно вызвано лекарственно-устойчивыми патогенами [2]. Каждая десятая смерть в связи с беременностью и родами происходит по причине материнского сепсиса, при этом 95 % случаев смерти от материнского сепсиса происходит в странах с низким и средним уровнем доходов на душу населения. Распространенность случаев сепсиса, демографические и экономические потери при данном заболевании недостаточно изучены. Среди причин смертности населения сепсис занимает 11 место [3]. В настоящий период отмечается повышение значимости сепсиса как наиболее важной причины смертности людей, доля которой достигает до 20 % всех смертей на планете. Средний возраст пациентов, страдающих сепсисом, около 60 лет, но среди новорожденных частота сепсиса также высока и достигает 500 случаев на 100 000. Особенно это заметно в группе детей с малой массой тела [4]. При тяжелом течении сепсиса летальность варьирует от 14 до 34 %. Этиологически значимыми бактериями при сепсисе являются коагулазонегативные стафилококки (15,9 %), кишечная палочка (13,0 %), золотистый стафилококк (11,7 %), клебсиелла пневмонии (9,8 %), энтеробактер (9,5 %), ацинетобактер (9,2 %), палочка синезеленого гноя (5,7 %) и грибы рода кандиды (5,1 %). При этом доля грамотрицательных бактерий составляет более 50 %, а метициллинрезистентных стафилококков (MRSA) достигает 51 % [3; 5]. Своевременная лабораторная диагностика и адекватное патогенетическое и этиотропное лечение являются крайне важными для регулирования этой проблемы. В тактике лечения сепсиса необходимо руководствоваться эффективными и точными методами выделения и идентификации этиологически значимого инфекционного агента и корректными данными о чувствительности к антибиотикам чистых культур бактерий.

Иммунологические и метаболические механизмы патофизиологии сепсиса, приводящие к развитию полиорганной недостаточности и смерти пациентов до настоящего времени не установлены. Вместе с тем более полное понимание механизмов развития сепсиса представляется важнейшим этапом в разработке профилактических и терапевтических мероприятий, повышающих выживаемость пациентов.

Хотя развитие сепсиса и септического шока связывают с чрезмерной активацией иммунной системы, текущие данные показывают, что после короткой провоспалительной фазы у септических пациентов развиваются негативные регуляторные механизмы, направленные на ингибирование процессов гипериммунной активации. У некоторых пациентов это может привести к глубокой иммуносупрессии, затрагивающей как врожденный, так и адаптивный иммунитет. Иммуносупрессия, ассоциированная с сепсисом, препятствует эффективной элиминации первичной инфекции, связана с повышенным риском возникновения случаев внутрибольничных инфекций и способствует реактивации латентных герпесвирусов (цитомегаловирус или вирус простого герпеса) [6].

В настоящее время ведущую роль в реализации врожденного иммунитета отводят системе мононуклеарных фагоцитов. Под термином «система мононуклеарных фагоцитов» понимают миелоидную линию клеток, включающую костномозговые предшественники, циркулирующие моноциты, резидентные макрофаги и дендритные клетки (ДК) [7].

Моноциты и ДК крови представляют особый интерес для изучения при сепсисе не только потому, что они играют ключевую роль в противоинфекционном иммунитете, но и потому, что они являются, по сути, незрелыми клетками, мигрирующими из костного мозга в периферические органы для дальнейшей дифференцировки. Также моноциты, макрофаги и ДК осуществляют

ют захват и последующий киллинг микроорганизмов, перерабатывают и представляют их антигены на мембране в комплексе с молекулами МНС II класса, тем самым инициируют Т-клеточный иммунный ответ [8].

В последнее время пристальное внимание стало уделяться миелоидным супрессорным клеткам (МЛСК), которые представляют собой гетерогенную группу пластичных миелоидных клеток, образуемых из незрелых миелоидных предшественников в костном мозге, редко выявляются у здоровых людей и появляются в крови при различных патологических состояниях. МЛСК весьма эффективно подавляют иммунный ответ, уменьшая число антиген-специфических Т-клеток. Учитывая способность МЛСК подавлять пролиферацию и создавать условия анергии Т-клеток, в том числе CD8-лимфоцитов, стимулировать образование Т-регуляторных клеток, а также ингибировать функциональную активность антигенпрезентирующих клеток, было высказано предположение, что МЛСК имеют важное значение в хронизации инфекционных процессов и в механизмах иммуносупрессии [7; 8].

Регуляторные Т-клетки (T_{reg} -клетки), которые составляют менее 10 % от общей популяции $CD4^+$ Т-клеток в лимфатических узлах и кровообращении, играют критическую роль в модуляции функций иммунных клеток. Основная их функция – контроль силы и продолжительности иммунного ответа посредством регуляции функций Т-эффекторных клеток ($CD4^+$ - и $CD8^+$ -Т-лимфоцитов). Оценка содержания T_{reg} -клеток в крови у пациентов отделения реанимации и интенсивной терапии может рассматриваться как прогностический маркер развития септических осложнений и неблагоприятного исхода [9].

Из вышеизложенного следует, что изучение количественных и функциональных характеристик клеток системы мононуклеарных фагоцитов, МЛСК и T_{reg} -клеток у пациентов с сепсисом с новых позиций является необходимым этапом в раскрытии механизмов иммунопатологии при сепсисе.

Целью настоящего исследования являлось изучение изменений относительного и абсолютного содержания в крови пациентов с сепсисом и септическим шоком субпопуляций моноцитов, дендритных клеток, миелоидных супрессорных клеток, регуляторных Т-лимфоцитов на 3–4 день от постановки диагноза с целью оценки формирования стадии иммуносупрессии.

Материалы и методы исследования. Объектом исследования была кровь от пациентов с диагнозом сепсис и септический шок (УЗ «Городская клиническая больница скорой медицинской помощи» и УЗ «Городская клиническая инфекционная больница» г. Минск) и кровь донорская неопробованная (ГУ «Республиканский научно-практический центр трансфузиологии и медицинских биотехнологий»).

Обследовано 33 пациента с сепсисом (19 мужчин и 14 женщин, возраст $57,1 \pm 19,9$ лет) и 6 пациентов с септическим шоком (2 мужчин и 4 женщины, возраст $49,3 \pm 19,6$ лет). Забор крови производился на 3–4 сутки от установления диагноза. Контрольная группа включала 30 здоровых доноров.

Субпопуляции моноцитов, дендритных клеток, миелоидных супрессорных клеток, T_{reg} -клеток определяли методом проточной цитометрии, используя следующие моноклональные антитела: lin (CD3, CD14, CD16, CD19, CD20, CD56), CD4 (клон MEM-241), CD11b (клон ICRF44), CD11c (клон BU15), CD14 (клон MEM-15), CD15 (клон W6D3), CD33 (клон 6C5), CD16 (клон CB16), CD25 (клон MEM-181), CD45 (клон HI30), CD123 (клон 6H6), CD127 (клон AO19D5) и HLA-DR (клон L243). Для этого цельную кровь окрашивали соответствующими моноклональными антителами. После инкубации в течение 15 мин образцы лизировали лизирующим раствором RBC Lysis Buffer (BioLegend, США). Оставшиеся лейкоциты промывали после лизиса фосфатно-солевым буфером (ФСБ), pH 7,2 (Capricorn Scientific GmbH, Германия). После восстановления в ФСБ клетки анализировали с помощью проточного цитофлюориметра FACSCalibur (Becton Dickinson, США).

Гейтирование проводили согласно общепринятым методикам [10–12]. Для корректной настройки параметров компенсации для каждой группы образцов готовили single-stained контроли. Данные анализировали при помощи программы FACSDiva версии 7.

Статистическую обработку полученных данных проводили с использованием программы Statistica версии 10. Значения показателей представлены в виде Me (25–75), где Me – медиана,

а 25 и 75 – интерквартильный размах в виде 25-й и 75-й перцентилей. Для сравнения двух независимых выборок применяли *U*-критерий Манна–Уитни. В качестве критерия достоверности различий показателей принимали уровень значимости $p < 0,05$.

Результаты и их обсуждение. *Изменения в структуре субпопуляций моноцитов.* Мононуклеарные фагоциты – моноциты, макрофаги и дендритные клетки играют важнейшую роль в защитных механизмах как естественного (распознавание, переработка чужеродных субстанций, продукция цитокинов), так и адаптивного (антигенпрезентация, регуляция гуморальных и клеточных механизмов) иммунитета. Формируясь в костном мозге моноциты мигрируют в периферическую кровь, где циркулируют в течение нескольких дней и затем рекрутируются в ткани. Немигрировавшие в ткани клетки погибают в результате апоптоза. В процессе развития разных патологических процессов в кинетике обмена моноцитов и обратной связи с костным мозгом происходит ряд иммунорегуляторных процессов, изменяющих экспрессии многих генов и, соответственно, функциональные свойства моноцитов, что позволяет их классифицировать как отдельные субпопуляции [7]. HLA-DR⁺ антигены относятся к семейству молекул главного комплекса гистосовместимости II класса, обеспечивают распознавание антигенных мотивов чужеродных структур и представление иммуоэпитопов субпопуляциям зрелых CD4⁺ Т-лимфоцитов [13]. Из представленных в табл. 1 данных видно, что в периферической крови пациентов с сепсисом и септическим шоком достоверно ($p < 0,05$) снижается относительное и абсолютное содержание моноцитов, экспрессирующих HLA-DR⁺ молекулы. Снижение экспрессии HLA-DR⁺ рецепторов моноцитами может рассматриваться как ослабление их функциональной роли в стимуляции специфического иммунного ответа.

Т а б л и ц а 1. Относительное и абсолютное содержание субпопуляций моноцитов периферической крови доноров и пациентов с бактериальным сепсисом, Me (Q1–Q3)

T a b l e 1. Relative and absolute content of the subpopulations of monocytes of the peripheral blood of donors and patients with sepsis, Me (Q1–Q3)

Параметр Parameter	Доноры, $n = 30$ Donors, $n = 30$	Пациенты с сепсисом, $n = 33$ Patients with sepsis, $n = 33$	Пациенты с септическим шоком, $n = 6$ Patients with septic shock, $n = 6$
HLA-DR ⁺ : % от числа моноцитов $\times 10^6$ /мл	85,58 (82,86–88,68) 0,337 (0,290–0,416)	59,7 (36,2–70,6)* 0,244 (0,117–0,412)*	53,42 (42,55–70,48)* 0,199 (0,074–0,903)
CD14 ⁺⁺ CD16 ⁻ классические: % от числа моноцитов $\times 10^6$ /мл	82,53 (80,60–84,15) 0,327 (0,274–0,404)	71,36 (58,1–78,82)* 0,342 (0,220–0,401)	70,2 (59,08–74,48)* 0,224 (0,110–0,898)
CD14 ⁺⁺ CD16 ⁺ промежуточные: % от числа моноцитов $\times 10^6$ /мл	10,08 (8,33–11,37) 0,037 (0,031–0,049)	21,02 (12,52–29,18)* 0,078 (0,053–0,159)*	19,76 (15,00–30,69)* 0,060 (0,024–0,565)
CD14 ^{+/-} CD16 ⁺ неклассические: % от числа моноцитов $\times 10^6$ /мл	6,01 (5,18–7,27) 0,024 (0,020–0,033)	2,42 (1,46–5,45)* 0,013 (0,005–0,029)*	5,10 (2,85–11,52) 0,011 (0,005–0,138)

П р и м е ч а н и е: * – достоверные различия ($p < 0,05$) между донорами и пациентами.

N o t e: * – significant differences ($p < 0.05$) between donors and patients.

Одновременно пациенты с сепсисом характеризуются снижением в крови относительного содержания субпопуляции CD14⁺⁺CD16⁻ классических моноцитов ($p < 0,05$). Абсолютное содержание субпопуляции классических моноцитов в крови пациентов с сепсисом и септическим шоком также снижено, хотя и не достигает уровня достоверности ($p > 0,05$). Следует отметить, что классические моноциты способны продуцировать как про-, так и противовоспалительные цитокины, а основными их функциями являются фагоцитоз и противомикробная активность. Эти моноциты мало эффективны в генезе воспаления при бактериальных заболеваниях.

В противоположность выше описанной тенденции, в субпопуляции промежуточных моноцитов (CD14⁺⁺CD16⁺) отмечается существенное увеличение как их относительного содержания в группе пациентов с сепсисом и септическим шоком ($p < 0,05$), так и абсолютного содержания этих клеток в группе пациентов с сепсисом ($p < 0,05$). Физиологической ролью промежуточных моноцитов помимо фагоцитарной активности является способность процессировать и презентовать чужеродные антигены Т-лимфоцитам, а также участвовать в индукции хронического

воспаления. Моноциты этого типа также экспрессируют высокий уровень хемокиновых рецепторов, продуцируют IL-10, определяют уровень активности локального и системного воспаления [6; 7].

В крови пациентов с сепсисом отмечены также значимые изменения в содержании субпопуляции неклассических моноцитов (CD14⁺CD16⁺) – достоверное снижение их относительного и абсолютного содержания у пациентов с сепсисом при отсутствии таковых в группе пациентов с септическим шоком ($p > 0,05$). Моноциты данного фенотипа экспрессируют широкий спектр поверхностных молекул, патрулируют ткани организма, включая стенки сосудов, что важно в развитии синдрома системной воспалительной реакции при сепсисе.

Влияние факторов сепсиса на субпопуляции моноцитов человека было предметом интенсивных исследований в течение последних пятидесяти лет. Сниженная способность моноцитов крови пациентов с сепсисом высвобождать провоспалительные цитокины после воздействия эндотоксина (липополисахарида – ЛПС) была описана как эндотоксин-индуцированная толерантность, что, как предполагается, способствует развитию неблагоприятных краткосрочных и долгосрочных осложнений при сепсисе. Хотя различные сложные сигнальные пути мононуклеарных клеток изменяются и способствуют установлению толерантности к эндотоксину, основное воздействие на моноциты заключается в снижении представления антигена, связанного со снижением экспрессии молекул HLA-DR на клеточной поверхности. В дополнение к явному и стойкому снижению экспрессии HLA-DR молекул на клеточной поверхности, моноциты пациентов с сепсисом также демонстрируют сниженную способность секретировать провоспалительные цитокины TNF, IL-1, IL-6 и IL-12 после воздействия ЛПС [14]. Снижение способности моноцитов секретировать провоспалительные цитокины позволяет предположить, что механизмы внутриклеточной передачи сигналов смещаются в сторону продукции противовоспалительных медиаторов, которые ассоциируются с внутрибольничными, текущими и вторичными инфекциями, что в конечном итоге увеличивает смертность при сепсисе.

Изменения субпопуляций дендритных клеток. Дендритные клетки являются естественными антигенпрезентирующими клетками, которые экспрессируют HLA-DR⁺ молекулы распознавания чужеродных для организма антигенов. Они подразделяются на 2 субпопуляции – моноцитарные и плазмацитоидные [7]. Из представленных в табл. 2 данных видно, что относительное и абсолютное содержание плазмацитоидных дендритных клеток (пДК CD123⁺CD11c⁻) достоверно снижено в обеих группах пациентов – с сепсисом и септическим шоком ($p < 0,05$). Аналогичная тенденция имела место и с содержанием в крови пациентов моноцитарных дендритных клеток (мДК CD123⁻CD11c⁺).

Т а б л и ц а 2. Относительное и абсолютное содержание субпопуляций дендритных клеток в периферической крови доноров и пациентов с бактериальным сепсисом, Ме (Q1–Q3)

T a b l e 2. Relative and absolute content of the subpopulations of the dendritic cells of the peripheral blood of donors and patients with bacterial sepsis, Me (Q1–Q3)

Параметр Parameter	Доноры, $n = 30$ Donors, $n = 30$	Пациенты с сепсисом, $n = 33$ Patients with sepsis, $n = 33$	Пациенты с септическим шоком, $n = 6$ Patients with septic shock, $n = 6$
пДК CD123 ⁺ CD11c ⁻ : % от числа лейкоцитов $\times 10^6/\text{мл}$	0,162 (0,137-0,197) 0,01 (0,008-0,011)	0,009 (0,005-0,029)* 0,001 (0,001-0,003)*	0,019 (0,004-0,036)* 0,001 (0,0008-0,0052)*
мДК CD123 ⁻ CD11c ⁺ : % от числа лейкоцитов $\times 10^6/\text{мл}$	0,290 (0,241-0,386) 0,018 (0,013-0,024)	0,015 (0,009-0,050)* 0,002 (0,001-0,003)*	0,015 (0,004-0,095)* 0,003 (0,0004-0,0139)*

П р и м е ч а н и е: * – достоверные различия ($p < 0,05$) между донорами и пациентами.

N o t e: * – significant differences ($p < 0.05$) between donors and patients.

Основную роль в развитии иммуносупрессии при сепсисе многие исследователи отводят сепсис-индуцированному апоптозу иммунных клеток. Так, апоптоз вызывает глубокое истощение иммунных клеток, включая CD4⁺, CD8⁺ Т-клетки и В-клетки в различных органах пациентов. По литературным данным, дендритные клетки особенно уязвимы к сепсис-индуцированному апоптозу [14]. Показано, что у пациентов с сепсисом не только снижено количество ДК, но

и выжившие ДК имеют более низкую экспрессию HLA-DR и продуцируют повышенные количества IL-10. Кроме того, полученные из моноцитов ДК у пациентов с сепсисом были не способны индуцировать сильный ответ эффекторных Т-клеток, но вместо этого индуцировали либо анергию Т-клеток, либо пролиферацию T_{reg} -клеток [14]. Таким образом, так как ДК играют важную роль в распознавании патогенов и связывании врожденной и адаптивной иммунных систем во время инфекции, то увеличение количества и функции ДК может стать мишенью возможных будущих терапевтических тактик при сепсисе.

Изменения субпопуляции миелоидных супрессорных клеток. Популяция миелоидных супрессорных клеток является чувствительным маркером развития ряда иммунопатологических процессов, включая сепсис. Миелоидные супрессорные клетки (МЛСК) – это незрелые клетки миелоидного происхождения, способные подавлять эффекторный иммунный ответ. В настоящее время охарактеризованы две основные популяции МЛСК: моноцитарные (М-МЛСК) с фенотипом $CD14^+HLA-DR^-$ и гранулоцитарные (Г-МЛСК) с фенотипом $lin^- HLA-DR-CD11b^+CD15^+/CD33^+$. М-МЛСК считаются более зрелыми, а Г-МЛСК – менее зрелыми [7]. Согласно полученным данным, приведенным в табл. 3, содержание в крови пациентов клеток, относящихся к субпопуляции М-МЛСК, $CD14^+HLA-DR^-$ достоверно снижено у пациентов с сепсисом ($p < 0,05$) и не отличалось от данных контроля у пациентов с септическим шоком ($p > 0,05$). В то же время содержание Г-МЛСК с иммунофенотипом $lin^- HLA-DR-CD11b^+CD15^+$ характеризовалось достоверным повышением у пациентов обеих групп – с сепсисом и септическим шоком ($p < 0,05$). А субпопуляция Г-МЛСК иммунофенотипа $lin^- HLA-DR-CD11b^+CD33^+$ имела тенденцию к повышению как относительного, так и абсолютного содержания и достигала уровня достоверности в группе пациентов с септическим шоком ($p < 0,05$).

Т а б л и ц а 3. Относительное и абсолютное содержание субпопуляций МЛСК периферической крови доноров и пациентов с бактериальным сепсисом, Me (Q1–Q3)

Table 3. Relative and absolute content of the subpopulations of myeloid suppressor cells of the peripheral blood of donors and patients with bacterial sepsis, Me (Q1–Q3)

Параметр Parameter	Доноры, $n = 30$ Donors, $n = 30$	Пациенты с сепсисом, $n = 33$ Patients with sepsis, $n = 33$	Пациенты с септическим шоком, $n = 6$ Patients with septic shock, $n = 6$
М-МЛСК $CD14^+HLA-DR^-$ % от числа лейкоцитов $\times 10^6/мл$	0,32 (0,2–0,37) 0,017 (0,014–0,022)	0,36 (0,10–0,74) 0,049 (0,013–0,091)*	0,21 (0,08–0,91) 0,033 (0,008–0,104)
Г-МЛСК $lin^- HLA-DR-CD11b^+CD15^+$ % от числа лейкоцитов $\times 10^6/мл$	0,060 (0,032–0,081) 0,003 (0,002–0,004)	0,317 (0,168–0,1019)* 0,043 (0,021–0,141)*	0,452 (0,103–0,912)* 0,053 (0,011–0,140)*
Г-МЛСК $lin^- HLA-DR-CD11b^+CD33^+$ % от числа лейкоцитов $\times 10^6/мл$	0,032 (0,018–0,097) 0,002 (0,001–0,006)	0,048 (0,011–0,088) 0,004 (0,001–0,012)	0,089 (0,027–0,197) 0,006 (0,003–0,0508)*
T_{reg} -клетки $CD4^+CD25^+CD127^-$ % от числа лейкоцитов $\times 10^9/мл$	0,95 (0,70–1,38) 0,059 (0,042–0,084)	0,87 (0,41–1,54) 0,107 (0,037–0,227)*	1,06 (0,46–1,92) 0,181 (0,044–0,232)*

Примечание: * – достоверные различия ($p < 0,05$) между донорами и пациентами.

Note: * – significant differences ($p < 0.05$) between donors and patients.

В экспериментальных моделях сепсиса было показано, что МЛСК блокируют специфические функции Т-клеток, включая пролиферацию и продукцию IFN γ и IL-2. Однако в то же время МЛСК могут либо усиливать, либо ослаблять воспалительную реакцию, связанную с сепсисом, в зависимости от стадии заболевания [7].

Регуляторные $CD4^+CD25^+CD127^-$ Т-лимфоциты. Регуляторные Т-клетки – активные участники системного воспалительного ответа как на этапе гипервоспаления, так и на этапе ограничения аутогенного повреждения тканей посредством усиления иммуносупрессии [15]. Однако эти супрессивные функции нарушаются во время сепсиса, что, в свою очередь, наносит ущерб активации и пролиферации эффекторных Т-клеток в ходе заболевания. T_{reg} -клетки менее восприимчивы к апоптозу во время сепсиса, в отличие от других популяций Т-клеток. Мишенью действия T_{reg} -клеток являются как Т-эффекторные клетки, так и дендритные клетки, ответственные за презентацию антигена и активацию Т-клеток. T_{reg} -клетки, взаимодействуя с рецептором CD86 на дендритных клетках при помощи CTLA-4, способны ингибировать активацию дендритными клетками Т-клеток [9].

В нашем исследовании анализ изменений в содержании $CD4^+CD25^+CD127^-$ регуляторных Т-клеток показал достоверное увеличение абсолютного количества T_{reg} -клеток как у пациентов с сепсисом, так и у пациентов с септическим шоком, в сравнении с группой контроля ($p < 0,05$). Увеличение доли $CD4^+CD25^+CD127^-$ клеток ассоциируется с появлением супрессорной активности мононуклеарных клеток, что при дальнейшем исследовании может быть маркером начала стадии иммуносупрессии (иммунопаралича) при сепсисе.

Заключение. В настоящей работе проведен комплексный анализ содержания субпопуляций моноцитов, регуляторных Т-клеток, дендритных и миелоидных супрессорных клеток в периферической крови пациентов с сепсисом и септическим шоком. В данном исследовании материал забирался на 3–4-е сутки от поставленного диагноза. Проведенные исследования выявили достоверное снижение экспрессии HLA-DR на моноцитах, снижение относительного содержания классических моноцитов, миелоидных и плазматоидных дендритных клеток, увеличение процентного содержания промежуточных моноцитов и Г-МЛСК $CD15^+$, увеличение абсолютного содержания T_{reg} -клеток у пациентов с сепсисом и септическим шоком. Выявленные функциональные дефекты и сдвиги в составе популяции лейкоцитов могут свидетельствовать о начале стадии иммуносупрессии при сепсисе.

Основная проблема при изучении механизмов прогрессирования сепсиса – его многофакторность и вариабельность иммунного ответа между пациентами. Сепсис вызывает множество дефектов в функционировании основных звеньев иммунитета, равно как и накладывается на существующие особенности иммунной системы пациентов, которые способствуют затяжному воспалению, подавлению иммунитета, восприимчивости к инфекциям. Несмотря на то что существуют клеточные методологии для выявления пациентов с иммунной дисрегуляцией, до сих пор неясно, какие вмешательства и в какие периоды болезни, направленные на устранение клеточно-специфического дефицита, будут наиболее полезными для выживания при сепсисе.

Список использованных источников

1. The global burden of sepsis: barriers and potential solutions / K. E. Rudd [et al.] // *Crit. Care.* – 2018. – Vol. 22. – Art. 232. <https://doi.org/10.1186/s13054-018-2157-z>
2. Якубцевич, Р. Э. Сепсис в интенсивной терапии: современные аспекты диагностики / Р. Э. Якубцевич // *Журн. Грод. гос. мед. ун-та.* – 2016. – № 1. – С. 11–16.
3. Качанко, Е. Ф. Антимикробная терапия при сепсисе / Е. Ф. Качанко, М. Г. Козаченко, И. А. Карпов // *Мед. новости.* – 2006. – Т. 2, № 8. – С. 36–42.
4. Нозокомиальный сепсис / Н. В. Соловей [и др.] // *Клиническая инфектология и паразитология: науч. материалы, посвящ. 100-летию Минской городской клин. инфекционной больницы.* – 2013. – Т. 3, прилож. – С. 68–102.
5. Microbiological characteristics of sepsis in a University hospital / A. V. Vendemiato [et al.] // *BMC Infect. Dis.* – 2015. – Vol. 15, N 1. – Art. 58. <https://doi.org/10.1186/s12879-015-0798-y>
6. Characterization of Circulating IL-10-Producing Cells in Septic Shock Patients: A Proof of Concept Study / A. Fabri [et al.] // *Front Immunol.* – 2021. – Vol. 11. – Art. 615009. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2020.615009>
7. Титов, Л. П. Моноциты, макрофаги, дендритные и миелоидные супрессорные клетки: генез, классификация, иммунобиологические свойства / Л. П. Титов // *Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. мед. навук.* – 2018. – Т. 15, № 3. – С. 363–382. <https://doi.org/10.29235/1814-6023-2018-15-3-363-382>
8. Состояние системы мононуклеарных фагоцитов (моноцитов, дендритных клеток) у пациентов с разными формами лекарственно-устойчивого туберкулеза легких / А. Е. Гончаров [и др.] // *Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. мед. навук.* – 2012. – № 4. – С. 4–15.
9. Чурина, Е. Г. Факторы иммуносупрессии при различных патологиях / Е. Г. Чурина, В. В. Новицкий, О. И. Уразова // *Бюл. сибирской медицины.* – 2011. – Т. 10, № 4. – С. 103–111.
10. CD14, CD16 and HLA-DR reliably identifies human monocytes and their subsets in the context of pathologically reduced HLA-DR expression by CD14(hi)/CD16(neg) monocytes: Expansion of CD14(hi)/CD16(pos) and contraction of CD14(lo)/CD16(pos) monocytes in acute liver failure / R. D. Abeles [et al.] // *Cytometry A.* – 2012. – Vol. 81, N 10. – P. 823–834. <https://doi.org/10.1002/cyto.a.22104>
11. Evaluation of a 12-color flow cytometry panel to study lymphocyte, monocyte, and dendritic cell subsets in humans / P. Autissier [et al.] // *Cytometry A.* – 2010. – Vol. 77, N 5. – P. 410–419. <https://doi.org/10.1002/cyto.a.20859>
12. A new procedure to analyze polymorphonuclear myeloid derived suppressor cells in cryopreserved samples cells by flow cytometry / A. Sacchi [et al.] // *PLoS One.* – 2018. – Vol. 13, N 8. – Art. e0202920. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0202920>
13. Изменения экспрессии HLA-DR-антигенов на моноцитах у детей и ее клиническая значимость при сепсисе / А. В. Зурочка [и др.] // *Мед. иммунология.* – 2008. – Т. 10, № 4–5. – С. 379–388. <https://doi.org/10.15789/1563-0625-2008-4-5-379-388>
14. Hotchkiss, R. S. Sepsis-induced immunosuppression: from cellular dysfunctions to immunotherapy / R. S. Hotchkiss, G. Monneret, D. Payen // *Nat. Rev. Immunol.* – 2013. – Vol. 13, N 12. – P. 862–874. <https://doi.org/10.1038/nri3552>

15. Роль регуляторных Т-клеток в системном воспалительном ответе / М. Ю. Ханова [и др.] // Комплексные проблемы сердечно-сосудистых заболеваний. – 2020. – Т. 9, № 2. – Р. 82–90. <https://doi.org/10.17802/2306-1278-2020-9-2-82-90>

References

- Rudd K. E., Kissoon N., Limmathurotsakul D., Bory S., Mutahunga B., Seymour C. W., Angus D. C., West T. E. The global burden of sepsis: barriers and potential solutions. *Critical Care*, 2018, vol. 22, no. 1, art. 232. <https://doi.org/10.1186/s13054-018-2157-z>
- Yakubtsevich R. E. Sepsis in the intensive care unit: modern aspects of diagnosis. *Zhurnal Grodnenskogo gosudarstvennogo medicinskogo universiteta = Journal of Grodno State Medical University*, 2016, no. 1, pp. 11–16 (in Russian).
- Kachanko E. F., Kozachenko M. G., Karpov I. A. Antimicrobial therapy for sepsis. *Medicinskie novosti = Medical news*, 2006, vol. 2, no. 8, pp. 36–42 (in Russian).
- Solovej N. V., Kachanko E. F., Gorbich Yu. L., Shcherba V. V., Sergeev S. M., Gucalyuk I. Ya., Blatun E. M., Yurovskij N. N., Paduto D. S., Anisko L. A. Nosocomial sepsis. *Klinicheskaya infektologiya i parazitologiya = Clinical Infectology and Parasitology*, 2013, vol. 3, pp. 68–102 (in Russian).
- Vendemiato A. V., von Nowakowski A., Marson F. A., Levy C. E. Microbiological characteristics of sepsis in a University hospital. *BMC Infectious Diseases*, 2015, vol. 15, no. 1, art. 58. <https://doi.org/10.1186/s12879-015-0798-y>
- Fabri A., Kandara K., Coudereau R., Gossez M., Abraham P., Monard C., Cour M., Rimmelé T., Argaud L., Monneret G., Venet F. Characterization of Circulating IL-10-Producing Cells in Septic Shock Patients: A Proof of Concept Study. *Frontiers in Immunology*, 2021, vol. 11, art. 615009. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2020.615009>
- Titov L. P. Monocytes, macrophages, dendritic and myeloid suppressor cells: genesis, classification, immunobiological properties. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seriya meditsinskikh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Medical series*, 2018, vol. 15, no. 3, pp. 363–382 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1814-6023-2018-15-3-363-382>
- Goncharov A. E., Titov L. P., Romanova I. V., Solodovnikova V. V., Vetushko D. A. The state of the system of mononuclear phagocytes (monocytes, dendritic cells) in patients with various forms of drug-resistant pulmonary tuberculosis. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seriya meditsinskikh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Medical series*, 2012, no. 4, pp. 4–15 (in Russian).
- Churina Ye. G., Novitsky V. V., Urazova O. I. Immunosuppression factors under various pathologies. *Byulleten' Sibirskoi Meditsiny = Bulletin of Siberian Medicine*, 2011, no. 4, pp. 103–111 (in Russian).
- Abeles R. D., McPhail M. J., Sowter D., Antoniadou C. G., Vergis N., Vijay G. K. M., Xystrakis E., Khamri W., Shawcross D. L., Ma Y., Wendon J. A., Vergani D. CD14, CD16 and HLA-DR reliably identifies human monocytes and their subsets in the context of pathologically reduced HLA-DR expression by CD14(hi)/CD16(neg) monocytes: Expansion of CD14(hi)/CD16(pos) and contraction of CD14(lo)/CD16(pos) monocytes in acute liver fail. *Cytometry Part A*, 2012, vol. 81, no. 10, pp. 823–834. <https://doi.org/10.1002/cyto.a.22104>
- Autissier P., Soulas C., Burdo T. H., Williams K. C. Evaluation of a 12-color flow cytometry panel to study lymphocyte, monocyte, and dendritic cell subsets in humans. *Cytometry Part A*, 2010, vol. 77, no. 5, pp. 410–419. <https://doi.org/10.1002/cyto.a.20859>
- Sacchi A., Tumino N., Grassi G., Casetti R., Cimini E., Bordoni V., Ammassari A., Antinori A., Agrati C. A new procedure to analyze polymorphonuclear myeloid derived suppressor cells in cryopreserved samples cells by flow cytometry. *Public Library of Science One*, 2018, vol. 13, no. 8, art. e0202920. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0202920>
- Zurochka A. V., Kotlyarov A. N., Kuvaytsev M. M., Kvyatkovskaya S. V., Zurochka V. A., Ryabova L. V., Khaidukov S. M. Changes of HLA-DR antigen expression on monocytes in children and their clinical significance in sepsis. *Medicinskaya immunologiya = Medical Immunology*, 2008, vol. 10, no. 4–5, pp. 379–388 (in Russian). <https://doi.org/10.15789/1563-0625-2008-4-5-379-388>
- Hotchkiss R. S., Monneret G., Payen D. Sepsis-induced immunosuppression: from cellular dysfunctions to immunotherapy. *Nature Reviews Immunology*, 2013, vol. 13, no. 12, pp. 862–874. <https://doi.org/10.1038/nri3552>
- Khanova M. Yu., Matveeva V. G., Antonova L. V., Grigoriev E. V. Role of regulatory T-cells in the systemic inflammatory response syndrome. *Kompleksnye problemy serdechno-sosudistykh zabolevanij = Complex Issues of Cardiovascular Diseases*, 2020, vol. 9, no. 2, pp. 82–90 (in Russian). <https://doi.org/10.17802/2306-1278-2020-9-2-82-90>

Информация об авторах

Титов Леонид Петрович – академик, д-р мед. наук, профессор, заведующий лабораторией. РНПЦ эпидемиологии и микробиологии (ул. Филимонова, 23, 220114, Минск, Республика Беларусь). E-mail: leonidtitov@tut.by.

Трусевич Маргарита Олеговна – науч. сотрудник. РНПЦ эпидемиологии и микробиологии (ул. Филимонова, 23, 220114, Минск, Республика Беларусь). E-mail: m.trusevich@tut.by.

Горбич Юрий Леонидович – канд. мед. наук, доцент, заведующий кафедрой. Белорусская медицинская академия последипломного образования (ул. П. Бровки, 3/3, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: y.gorbich@gmail.com.

Information about the authors

Titov Leonid P. – Academician, D. Sc. (Medicine), Professor, Head of the Laboratory. Republican Research and Practical Center for Epidemiology and Microbiology (23, Filimonov Str., 220114, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: leonidtitov@tut.by.

Trusevich Margarita O. – Researcher. Republican Research and Practical Center for Epidemiology and Microbiology (23, Filimonov Str., 220114, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: m.trusevich@tut.by.

Gorbich Yury L. – Ph. D. (Medicine), Associate Professor, Head of the Department. Belarusian Medical Academy of Postgraduate Education (3/3, P. Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: y.gorbich@gmail.com.

НАУКИ О ЗЕМЛЕ**EARTH SCIENCES**

УДК 551.582, 551.583

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-3-338-347>

Поступило в редакцию 26.04.2022

Received 26.04.2022

Академик В. Ф. Логинов¹, И. С. Данилович¹, Л. М. Китаев², Е. М. Акентьева³¹*Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь*²*Институт географии Российской академии наук, Москва, Российская Федерация*³*Главная геофизическая обсерватория имени А. И. Воейкова, Санкт-Петербург, Российская Федерация***СОВРЕМЕННЫЕ И ОЖИДАЕМЫЕ ГИДРОКЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ
В БАССЕЙНАХ БАЛТИЙСКОГО И АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ
В ПРЕДЕЛАХ ТЕРРИТОРИЙ БЕЛАРУСИ И РОССИИ**

Аннотация. В работе представлена оценка современных изменений температуры воздуха, осадков, снега и речного стока на территории бассейнов Балтийского и Арктических морей в пределах территорий Беларуси и России. Показано, что наблюдаемые положительные тренды температуры воздуха зимой связаны с распределением давления в Северной Атлантике и индексами Северо-Атлантического колебания, летом – с Атлантической мультideкадной осцилляцией. Изменения в режиме увлажнения синхронизированы с повышением давления в бароклинно-активных зонах Атлантики и ростом осадков в Европе с XX в. Междекадные колебания осадков в регионе связаны с динамикой циркумполярного вихря и индексами Арктической осцилляции (АО). Повышение осадков зимой наблюдается в отрицательную фазу АО и обусловлено увеличением повторяемости южных циклонов. Летом при отрицательной фазе АО отмечается снижение циклонической активности, рост осадков связан с конвективными процессами. На фоне роста температуры воздуха снижаются запасы воды в снеге, которые формируют весенние половодья в регионе, их высота значительно уменьшилась в последние десятилетия. В ближайшие 30 лет ожидается снижение температуры воздуха зимой в Балтийском бассейне и увеличение в Арктическом. Летом повышение температуры воздуха замедлится на нисходящей ветви Атлантической мультideкадной осцилляции в ближайшие десятилетия. В режиме увлажнения прогнозируется увеличение сезонных и суточных сумм осадков.

Ключевые слова: температура воздуха, осадки, речной сток, климатические проекции, Атлантическая мультideкадная осцилляция, Арктическая осцилляция, циклоны

Для цитирования. Современные и ожидаемые гидроклиматические изменения в бассейнах Балтийского и Арктических морей в пределах территорий Беларуси и России / В. Ф. Логинов [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2022. – Т. 66, № 3. – С. 338–347. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-3-338-347>

Academician Vladimir F. Loginov¹, Irina S. Danilovich¹, Lev V. Kitaev², Elena M. Akent'eva³¹*Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*²*Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*³*Main Geophysical Observatory named after A. I. Voeikova, Saint Petersburg, Russian Federation***CURRENT AND PROJECTED HYDROCLIMATIC CHANGES IN THE BALTIC
AND ARCTIC SEA BASINS IN THE TERRITORIES OF BELARUS AND RUSSIA**

Abstract. The article presents an assessment of current changes in air temperature, precipitation, snow and river runoff in the Baltic and Arctic Seas basins in the territories of Belarus and Russia. It is shown that the observed positive air temperature trends during the winter season are associated with the sea level pressure distribution in the North Atlantic and NAO indices. In summer, the temperature growth is correlated strongly with the Atlantic multi-decadal oscillation. Changes in the precipitation regime are synchronized with an increase in the sea level pressure in the baroclinic active zones of the Atlantic Ocean, which led to the precipitation increase in Europe since the second half of the 20th century. Interdecadal precipitation fluctuations in the study region are associated with the dynamics of the circumpolar vortex and Arctic oscillation (AO) indices. In winter, a precipitation increase is observed in the negative AO phase and is caused by an increase in the frequency of southern cyclones. In summer, when the AO phase is negative, the cyclonic activity decreases, and the

precipitation growth is associated with convective processes in the atmosphere. Snow precipitation and snow water equivalent are decreasing during recent decades due the air temperature significant growth. That led to the spring floods height decreasing in the region. In the next 30 years, a decrease in the winter air temperature in the Baltic Sea basin and its increase in the Arctic Sea are expected. In summer, the air temperature increase will slow down on the descending AMO branch in the coming decades. In the precipitation regime, the growth of seasonal and daily total precipitation is expected.

Keywords: air temperature, precipitation, river runoff, climate projections, Atlantic multidecadal oscillation, Arctic oscillation, cyclones

For citation. Loginov V. F., Danilovich I. S., Kitaev L. V., Akent'eva E. M. Current and projected hydroclimatic changes in the Baltic and Arctic sea basins in the territories of Belarus and Russia. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2022, vol. 66, no. 3, pp. 338–347 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-3-338-347>

Введение. Современное потепление климата, которое отмечается в глобальном масштабе, характеризуется повсеместным ростом температуры воздуха, увеличением повторяемости опасных и неблагоприятных явлений погоды, повышением уровня Мирового океана, снижением площадей ледников и разнонаправленными изменениями в режиме увлажнения. Ранее изученные региональные изменения климата показывают, что отмечается повышение температуры воздуха: в северном полушарии рост среднегодовой температуры воздуха оценивается в 0,25 °C за десятилетие [1], на Европейской территории России (ЕТР) температура воздуха повышается на 0,48–0,55 °C за десятилетие [2], на территории Беларуси потепление составляет 0,4 °C за десятилетие [3]. В режиме увлажнения более ранние исследования выявили увеличение количества осадков в северной Европе со второй половины XX в. [4] и тенденцию к их уменьшению в южной части с увеличением повторяемости засух [5].

Большинство глобальных и региональных климатических моделей указывают на возрастание в будущем средних, максимальных и минимальных значений температуры воздуха, уменьшение числа морозных дней, рост количества случаев интенсивных осадков и уменьшение числа дней с малым количеством осадков для многих регионов суши. Некоторые выводы характерны для территории Беларуси и Европейской территории России, но имеются региональные особенности в текущих и будущих климатических изменениях, которые оценены в данном исследовании.

Цель работы заключалась в оценке текущих изменений гидроклиматических характеристик и расчете их прогнозных значений для Балтийского и Арктического бассейнов в пределах территорий Беларуси и России.

Исходные данные и методология. В работе представлены расчеты сезонных значений, трендов и экстремумов гидроклиматических характеристик: температуры воздуха, осадков, запасов воды в снеге и речного стока. Оценка текущих изменений проводилась по данным наблюдений 35 метеорологических станций Белгидромета и Росгидромета в Балтийском и Арктическом бассейнах в пределах территорий Беларуси и России. Будущие изменения климатических характеристик (температуры воздуха и осадков) вычислялись путем интерполяции данных в узлах регулярной сетки на координатные положения метеорологических станций.

Расчеты средних многолетних значений гидроклиматических характеристик выполнены за различные периоды:

(1) 1966–2020 гг. – период для расчета трендов сезонных значений температуры воздуха, сезонных сумм осадков, запасов воды в снеге и максимальных расходов воды весеннего половодья по данным наблюдательной сети Белгидромета и Росгидромета;

(2) 1981–2020 гг. – исторический период для сравнения модельных расчетов и материалов наблюдений;

(3) 2021–2050 гг. – период для оценки будущих изменений температуры воздуха и осадков.

Для оценки будущих изменений климата в исследуемом регионе использованы результаты численного моделирования консорциума EURO-CORDEX (Coordinated Downscaling Experiment – European Domain), который является подпроектом Всемирной климатической программы ВМО [6]. Пространственное разрешение расчетов климатических моделей составляет 0,11 градуса, что соответствует расстоянию между узлами регулярной сетки ~12 км. В работе оценивались ожидаемые изменения климата при двух сценариях концентраций парниковых газов семейства RCP (Representative Concentration Pathways) – RCP45 и RCP85 [1].

В исследовании представлены расчеты на основе результатов, полученных с использованием комбинации глобальной и региональной моделей: ICHEC-EC-EARTH+RACMO22E, поскольку они имели наименьшие расхождения (из ансамбля моделей) с материалами фактических наблюдений. Расхождения температуры воздуха в основном не превышали $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, годовая погрешность составляет $0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$. Отклонения сезонных сумм осадков в исследуемом регионе составляли от 6 % весной до 11–13 % в остальные сезоны, годовые суммы различаются на 7 %. Под изменением климатических параметров в будущем понимается разность осредненных характеристик за период 2021–2050 гг. по отношению к 1981–2020 гг.

Результаты и их обсуждение. Современные изменения. Климатические изменения в бассейнах Балтийского и Арктических морей в пределах территории Беларуси и России в последние десятилетия характеризуются повышением температуры воздуха во все сезоны. Наибольшие изменения характерны для зимнего сезона, тренды сезонных значений температуры воздуха зимой за период 1966–2020 гг. увеличиваются с юга на север и составляют от $0,5$ до $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ за десятилетие в южной части Балтийского бассейна (территория Беларуси), $0,7$ – $0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ за десятилетие в северной части Балтийского бассейна (территория России), $0,9$ – $1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ за десятилетие в Арктическом бассейне.

Более интенсивный рост температуры воздуха в зимний сезон на севере связан с более быстрым потеплением в Арктическом бассейне. За последние полвека среднегодовая температура повысилась в регионе на $3,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, в то время как глобальная температура увеличилась примерно на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, что связано с сокращением площади морского льда в Арктике, и как следствие уменьшением отражаемой солнечной радиации, ускоряя сокращение льдов и темпы потепления.

Изменение температурного режима в исследуемом регионе и в целом в Европе в зимний сезон связано с колебаниями температуры поверхности океана и давления в Северной Атлантике, которые прослеживаются в квазишестидесятилетних колебаниях Атлантической мультideкадной осцилляции (АМО) и Северо-Атлантических колебаниях (САК) [7; 8]. Для зимнего периода корреляционная связь температурного режима на территории Беларуси и АМО за декабрь–март оценивается в $0,67$, с Северо-Атлантическим колебанием за декабрь–март – $0,57$, полученные коэффициенты корреляции являются статистически значимыми ($p_{\text{случ}} < 5\%$). На рис. 1, а представлена динамика изменения индексов САК и температуры воздуха в зимний период на севере и юге Балтийского бассейна. Рост температуры воздуха в 1980–1990-е годы синхронизирован с повышенными значениями индексов САК, указывающими на усиление зонального переноса в Атлантико-Европейском секторе и более интенсивное поступление относительно теплых и влажных воздушных масс с Атлантики в глубь континента.

В летний сезон отмечается обратное распределение величин трендов сезонной температуры воздуха, которые уменьшаются с юга на север. Наибольшие величины трендов отмечаются на

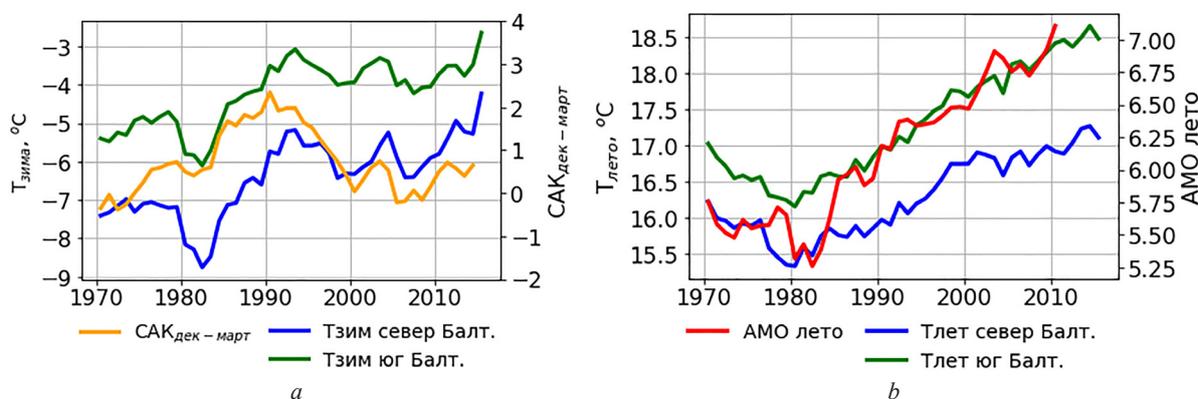


Рис. 1. Динамика средних значений температуры воздуха в зимний (а) и летний (б) сезоны, сезонных индексов САК и АМО, осредненных по скользящим 10-летним периодам за 1966–2020 гг.

Fig. 1. Dynamic of seasonal temperature means in winter (a), summer (b) and NAO, AMO seasonal indices, smoothed by 10 years periods for 1966–2020

юге исследуемого региона (территория Беларуси) и составляют 0,4–0,6 °C за десятилетие, в северной части Балтийского бассейна величина изменения составляет 0,3–0,4 °C за десятилетие, в Арктическом бассейне – 0,1–0,3 °C за десятилетие.

В [8] установлено, что изменение температуры воздуха в летний период на территории Восточной Европы (47–57° с. ш., 20–38° в. д.) связано с квазишестидесятилетними колебаниями АМО. Коэффициент корреляции между летней температурой в обозначенном регионе и АМО составляет 0,8, для летней температуры на территории Беларуси – 0,67, полученные коэффициенты корреляции являются статистически значимыми ($p_{\text{случ}} < 5\%$). Рис. 1, *b* демонстрирует повышение температуры воздуха в северной и южной частях бассейна Балтики, синхронизированное с ветвью подъема квазишестидесятилетнего цикла АМО. На нисходящей ветви АМО ожидается снижение летней температуры воздуха, как это наблюдалось в 1970–1980 гг.

Изменения в режиме увлажнения в исследуемом регионе менее однородны. В зимний сезон отмечается увеличение положительных величин трендов сезонных сумм осадков с юга на север в пределах Балтийского бассейна от 3–5 мм за десятилетие на юге до 15 мм за десятилетие на севере бассейна. В Арктическом бассейне отмечаются незначимые тренды в западной части и отрицательные тренды 5–10 мм за десятилетие в более континентальной восточной части бассейна.

Изменение режима увлажнения в исследуемом регионе сопоставимо с динамикой давления в бароклинно-активной зоне Северной Атлантики (45–60° с. ш., 25–0° з. д.) и АМО, с которым коррелирует в противофазе. На фазах роста давления в бароклинно-активной зоне океана количество атмосферных осадков в северо-западной части Европы увеличивается, а в юго-восточной уменьшается [8]. Повышение барического поля в обозначенных участках в океане на фоне пониженных значений АМО объясняет положительные тренды осадков в северной Европе во второй половине XX в. Тесная корреляционная связь АМО и зимних осадков в период за декабрь–март на территории Беларуси оценивается в 0,75 и объясняет наличие долгопериодных колебаний в режиме увлажнения в рассматриваемом регионе.

Междекадные изменения в режиме осадков связаны с циклонической деятельностью. Результаты более ранних исследований [9; 10] показали увеличение частоты циклонов в северной и центральной Европе, особенно северо-атлантических циклонов в зимний сезон, что привело к увеличению количества осадков в Северной и снижению в Центральной Европе.

Проведенное исследование показало, что отмечаются статистически незначимые тренды северо-атлантических циклонов в полосе 56–60° с. ш. в период 1949–2019 гг., при этом установлено сокращение расстояния между центрами северо-атлантических циклонов и территорией Беларуси на 100–200 км.

Это связано с климатической эволюцией циркумполярного вихря, которую можно проследить через динамику Арктической осцилляции (АО). При положительной фазе АО преобладает зональный перенос в слабовыраженные волны в атмосфере. Перемещение воздушных потоков и барических образований происходит в направлении с запада на восток вдоль высотного струйного течения на границе циркумполярного вихря. В таких случаях северо-атлантические циклоны перемещаются севернее территории Беларуси и осадки связаны с прохождением фронтальных разделов. При отрицательной фазе АО и формировании более выраженных волн в атмосфере сокращается расстояние между центрами циклонов и территорией Беларуси.

Исследование показало, что при отрицательной фазе АО рост осадков на территории Беларуси зимой связан с преобладанием меридиональной циркуляции и увеличением повторяемости южных циклонов, которые приносят обильные осадки. В то же время теплый сектор северо-атлантических циклонов, смещенный ближе к территории Беларуси, оказывает отепляющее влияние и обуславливает более интенсивное повышение зимних температур с конца 1990-х годов. Вследствие этого сменилась преобладающая фаза осадков, что наиболее выражено на юге Балтийского бассейна в пределах территории Беларуси: значительно увеличилась продолжительность выпадения жидких осадков и соответственно возросли суммарные показатели осадков.

На рис. 2, *a* представлено изменение сезонных сумм осадков и значений индексов АО в зимний период. На фоне общего роста осадков в Европе во второй половине XX в., краткосрочные

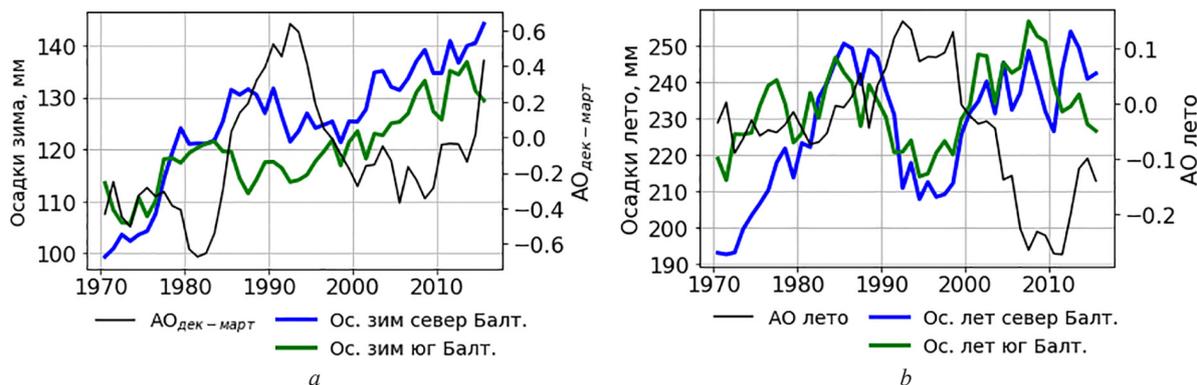


Рис. 2. Динамика сезонных сумм осадков в зимний (а) и летний (б) сезоны и сезонных индексов АО, осредненных по скользящим 10-летним периодам за 1966–2020 гг.

Fig. 2. Dynamic of seasonal precipitation totals in winter (a), summer (b) and seasonal AO indices, smoothed by 10 years periods for 1966–2020

периоды повышения осадков связаны с предшествующим понижением индексов АО. Летом (рис. 2, б) эта связь усиливается, коэффициент корреляции составляет $-0,62$, периоды роста/снижения осадков находятся в противофазе с АО. Полученные коэффициенты корреляции являются статистически значимыми ($p_{\text{случ}} < 5\%$).

В пространственном отношении распределение трендов летних сумм осадков характеризуется постепенным увеличением с юга на север. В южной части Балтийского бассейна (на территории Беларуси) на некоторых станциях отмечены отрицательные тренды летних сумм осадков в пределах 5 мм за десятилетие, что можно объяснить снижением циклонической активности летом, уменьшением повторяемости циклонов и усилением засушливости климата во время отрицательной фазы АО и роста повторяемости меридиональных типов циркуляции. Общее повышение летних осадков на территории Беларуси связано с ростом суточных максимумов осадков, обусловленных конвективными процессами в атмосфере [3]. В северной части Балтийского бассейна (включая север Беларуси и Ленинградскую область РФ) положительные тренды летних осадков на большинстве станций составляют 5–10 мм за десятилетие и связаны с осадками малой интенсивности при прохождении северо-атлантических циклонов. В Арктическом бассейне положительные тренды летних осадков достигают 10–25 мм, с наибольшими значениями в восточной части бассейна.

Изменение твердых осадков характеризуется отрицательными трендами в южной части исследуемого региона и их повышением к северу, что также объясняется приближением теплого сектора северо-атлантических циклонов. Максимальные запасы воды в снеге, которые характеризуют условия формирования и залегания снежного покрова, в южной части Балтийского бассейна отмечаются отрицательными трендами в пределах 4–6 мм за десятилетие, что свидетельствует о заметном снижении снегонакопления. В северной части Балтийского бассейна и западной части Арктического отмечается отсутствие или слабые положительные тренды максимальных запасов воды в снеге (до 2–4 мм за десятилетие). На станциях, расположенных на берегах Финского залива и Онежского озера, получены наибольшие отрицательные тренды максимальных запасов воды в снеге, которые составляют 10–12 мм за каждое десятилетие и связаны с отепляющим влиянием водных объектов.

Изменения климатических параметров отразились на формировании стока весеннего половодья, которое происходит под влиянием естественных и антропогенных факторов. В южной части Балтийского бассейна (на территории Беларуси), как показано в [11], антропогенное воздействие (масштабная мелиорация в основном в 1960-е годы) в первую очередь повлияло на водосборы малых рек, в то время как режим крупных рек более стабилен и зависит, в первую очередь, от изменения климата. В северной части Балтийского и Арктического бассейнов антропогенное влияние выражается в высокой степени зарегулированности рек гидротехническими сооружениями.

Исследования режима рек в связи с климатом на территории Беларуси не выявили значимых трендов годового речного стока [11–14]. Между тем, внутригодовое распределение стока за последние десятилетия существенно изменилось. В частности, значительно увеличился сток в периоды зимней межени. Это увеличение связано с ростом повторяемости оттепелей вследствие вышеописанных процессов в атмосфере, что привело к частым зимним паводкам, приходящимся на период зимней межени, в то время как весенний сток и высота половодий уменьшались из-за истощения запасов воды в снеге перед началом весеннего снеготаяния.

Согласно работе [15] наибольшее количество катастрофических и выдающихся наводнений в результате прохождения весенних половодий было зарегистрировано в 1950–1970-х годах (1951, 1953, 1956, 1958, 1962–1968, 1970, 1979) и было связано с преобладанием меридионального типа атмосферной циркуляции в 1940–1960-х годов, частыми заточками Арктического воздуха, устойчивыми отрицательными температурами в зимний период и значительными снеготаяниями перед началом половодий. В последние десятилетия на реках Беларуси отмечаются небольшие по высоте половодья (1994, 1996, 1999, 2004 и 2010, 2013 гг.).

В настоящем исследовании установлено продолжающееся снижение максимальных расходов воды в период весеннего половодья. В южной части Балтийского бассейна зафиксированы наибольшие изменения. Отрицательные тренды модулей максимального стока рек колеблются от 5–6 л/с км² за десятилетие в бассейнах малых рек в связи с их большей чувствительностью к климатическим аномалиям, таким как экстремальные осадки или засухи, на остальных реках снижение максимального стока составляет до 1–3 л/с км² за десятилетие. В северной части Балтийского бассейна отрицательные тренды варьируют в пределах 1–2 л/с км² за десятилетие. В Арктическом бассейне тренды модулей стока весеннего половодья характеризуются положительными значениями, которые не превышают 1 л/с км² за десятилетие.

Сценарии будущих изменений климата. Практический интерес представляют расчеты изменения климата на близкую перспективу (2021–2050 гг.). Согласно проведенным расчетам в ближайшие 30 лет ожидается небольшое снижение сезонной температуры воздуха зимой в восточной части Балтийского и западной части Арктического бассейнов. На рис. 3 представлены величины трендов сезонной температуры воздуха в период 2021–2050 гг. при реализации сценария концентрации парниковых газов RCP45.

При реализации сценария RCP45 зимой на юге Балтийского бассейна (территория Беларуси) снижение предположительно составит –0,6 °C за десятилетие, на севере Балтийского бассейна

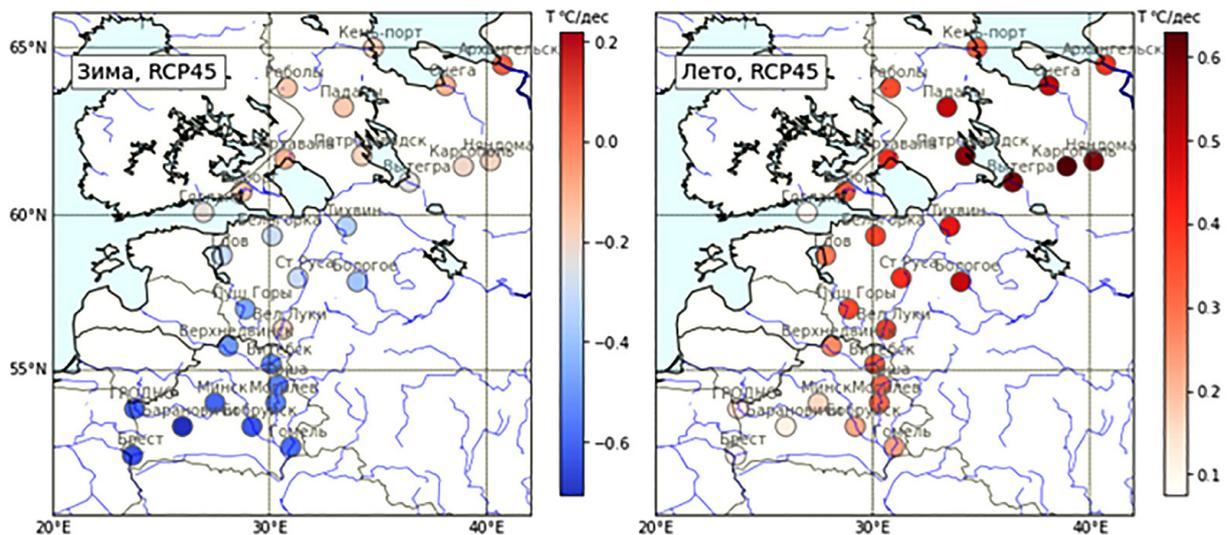


Рис. 3. Тренды сезонной температуры воздуха (2021–2050 гг.) согласно расчетам модели RACMO22E.ICHEC-EC-EARTH по сценарию RCP45

Fig. 3. Seasonal temperature trends (2021–2050) according to the model RACMO22E.ICHEC-EC-EARTH under RCP45 scenario

(Ленинградская область РФ) $-0,4$ °C за десятилетие, в западной части Арктического бассейна (территория РФ) ожидается увеличение сезонной температуры воздуха на $0,2$ °C за десятилетие. При реализации сценария RCP85 снижение температуры воздуха зимой ожидается на большей части рассматриваемой территории на $0,05-0,1$ °C за десятилетие, за исключением юго-запада Беларуси и крайнего севера Арктики, где ожидается повышение на $0,1-0,15$ °C за десятилетие.

Согласно сценарию RCP45 увеличение сезонной температуры воздуха летом предположительно составит от $0,1$ °C за десятилетие на юге рассматриваемой территории до $0,6$ °C за десятилетие на севере. В случае реализации сценария концентрации парниковых газов RCP85 рост сезонной температуры воздуха ожидается весной на $0,2-0,35$ °C за десятилетие.

Изменения температуры воздуха возрастают с юга на север. Градиент изменения температур воздуха в зимний сезон при обоих сценариях концентрации парниковых газов составляет $0,3$ °C на 1400 км. Летом изменения сезонной температуры воздуха ожидаются в пределах $0,1$ °C при сценарии RCP45 и без значимых пространственных изменений при сценарии RCP85.

Изменения в режиме осадков характеризуются разнонаправленными тенденциями. В случае реализации сценария концентрации парниковых газов RCP45 прогнозируется увеличение сезонных сумм осадков в зимний сезон на $10-20$ мм за десятилетие (рис. 4) на большей части исследуемой территории. Летом ожидается преимущественно рост сезонных сумм осадков на $5-15$ мм за десятилетие. Но следует ожидать значимое снижение летних осадков в Арктическом бассейне до $15-20$ мм за десятилетие.

Согласно расчетам по сценарию RCP85 ожидается повышение сезонных сумм осадков зимой до $4-5$ мм за десятилетие (за исключением крайнего севера в бассейне Арктики со снижением до 10 мм за десятилетие), летом увеличение осадков в рассматриваемом регионе предположительно составит от 5 до 15 мм за десятилетие.

Пространственные изменения сезонных сумм осадков зимой характеризуются незначительным повышением с юга на север в зимний сезон, которые предположительно составят 3 мм на 1400 км. Летом пространственные изменения более выражены: при сценарии RCP45 ожидается нарастание засушливости с юга на север, снижение летних сумм осадков может составить $10-15$ мм на 1400 км, при сценарии RCP85 ожидается обратное распределение, которое характеризуется ростом сезонных сумм осадков с юга на север в пределах 20 мм на 1400 км.

В южной части Балтийского бассейна прогнозируется увеличение суточных максимумов осадков на $1,5-3$ мм в весенний сезон, в остальные сезоны значимых изменений не прогнозируется, несмотря на значимый рост суточных максимумов осадков летом на территории Беларуси

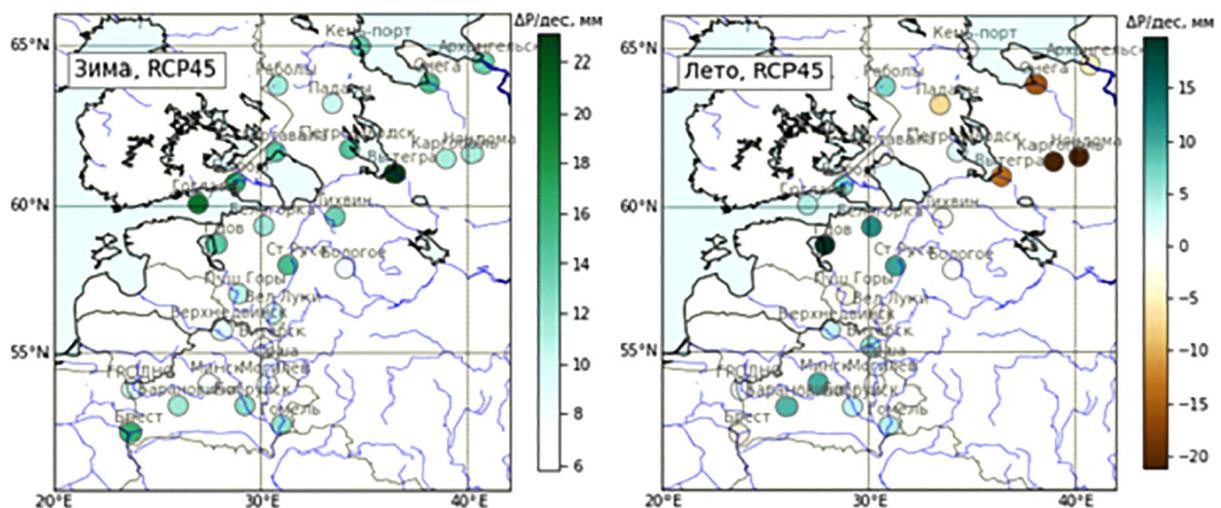


Рис. 4. Тренды сезонных сумм осадков (2021–2050 гг.) согласно расчетам модели RACMO22E.ICHEC-EC-EARTH по сценарию RCP45

Fig. 4. Seasonal precipitation trends (2021–2050) according to the model RACMO22E.ICHEC-EC-EARTH under RCP45 scenario

в период потепления. В северной части Балтийского бассейна ожидается увеличение максимумов осадков весной до 1,5 мм при сценарии RCP85. В бассейне Арктических морей зимой и весной ожидается увеличение до 1 мм, в летний сезон возможен рост на 1,5 мм при сценарии RCP85.

Заключение. Современные климатические изменения в бассейнах Балтийского и Арктических морей в пределах территории Беларуси и России характеризуются повышением температуры воздуха во все сезоны, но наибольшие изменения характерны для зимнего сезона с повышением в 2 раза с юга на север (от 0,6 °C на юге до 1,1 °C на севере). Более значимое повышение температуры воздуха на севере исследуемого региона зимой связано с более интенсивным потеплением Арктики вследствие сокращения площади морского льда более интенсивным прогревом. Изменения температурного режима в Балтийском бассейне зимой связаны с распределением давления в Северной Атлантике, которое хорошо описывается индексами Северо-Атлантического колебания и указывает на преобладание зонального типа циркуляции и более интенсивное поступление теплых и влажных воздушных масс с Атлантики.

Изменение температуры воздуха летом в рассматриваемом регионе тесно связано с динамикой температуры воды в океане, которую отражает Атлантическая мультideкадная осцилляция. Повышение температуры воздуха в Балтийском бассейне синхронизировано с ветвью подъема квазишестидесятилетнего цикла АМО с 1980-х годов. Величины трендов сезонной температуры воздуха летом составляют от 0,1 °C на севере до 0,5 °C за десятилетие в южной части Балтийского бассейна.

Изменения в режиме увлажнения обусловлены ростом давления в бароклинно-активной зоне Атлантического океана, с которым связан рост осадков в Европе со второй половины XX в. Долгопериодные тенденции роста осадков в Балтийском бассейне осложнены наложением междекадных изменений, которые связаны с динамикой циркумполярного вихря, колебанием индексов Арктической осцилляции и смещением траекторий циклонов. С начала 2000-х годов отмечается отрицательная фаза АО и преобладание меридионального типа циркуляции. Зимой повышение осадков связано с увеличением повторяемости влагонасыщенных южных циклонов и смещением на юг северо-атлантических циклонов. Летом повышение летних сумм осадков на юге Балтийского бассейна объясняется ростом конвективных осадков, на севере – прохождением северо-атлантических циклонов. Изменение твердых осадков характеризуется более значимым снижением снегонакопления в южной части исследуемого региона в связи с повышением температуры воздуха и их ростом к северу.

Годовой сток рек Балтийского бассейна изменился незначительно и увеличился в Арктическом бассейне. Максимальный сток весеннего половодья увеличился в Арктическом бассейне и снизился в Балтийском, особенно в его южной части.

Согласно расчетам климатической модели в ближайшие 30 лет ожидается снижение температуры воздуха зимой в Балтийском бассейне на $-0,1...-0,6$ °C за десятилетие и увеличение в Арктическом до 0,2 °C за десятилетие. Летом ожидаются положительные тренды температуры воздуха на 0,2–0,6 °C, хотя наступление нисходящей фазы АМО может привести к снижению скорости роста температуры.

В режиме осадков при сценарии RCP45 прогнозируется увеличение сезонных сумм осадков на 10–20 мм за десятилетие зимой, на 5–15 мм за десятилетие летом. При сценарии RCP85 рост осадков зимой ожидается до 4–5 мм за десятилетие, летом от 5 до 15 мм за десятилетие. В Балтийском бассейне прогнозируется увеличение суточных максимумов осадков на 1,5–3 мм, а в Арктическом бассейне – на 1 мм.

Благодарности. Работа с белорусской стороны выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант X20P-353) и с российской стороны – Российского научного фонда (грант 20-55-00007, тема 0148-2019-0009).

Acknowledgements. The study of the Belarusian researches was supported by the Belarusian Foundation for Fundamental Research (grant X20P-353) and the study of the Russian researches was supported by the Russian Science Foundation (grant 20-55-00007, topic 0148-2019-0009).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Pachauri, R. K. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change: Synthesis Report / IPCC, Core Writing Team; R. K. Pachauri, L. A. Meyer. – Geneva, 2014. – 151 p.
2. Крышнякова, В. С. Особенности потепления климата на Европейской территории России в современных условиях / В. С. Крышнякова, В. Н. Малинин // Общество. Среда. Развитие: Природная среда. – 2007. – Вып. 2. – С. 115–124.
3. Данилович, И. С. Текущие и ожидаемые изменения климата на территории Беларуси / И. С. Данилович, В. Ф. Логинов // Центральноазиатский журн. географ. исслед. – 2021. – Вып. 1–2. – С. 35–48.
4. Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin / BACC Author Team. – Springer, 2015. – 504 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-16006-1>
5. Long-term changes in drought indices in eastern and central Europe / J. Jaagus [et al.] // Intern. J. Climatology. – 2021. – Vol. 42, N 1. – P. 225–249. <https://doi.org/10.1002/joc.7241>
6. EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research / D. Jacob [et al.] // Regional Environmental Change. – 2014. – Vol. 14, N 2. – P. 563–578. <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2>
7. Логинов, В. Ф. Современные изменения глобального и регионального климата / В. Ф. Логинов, С. А. Лысенко. – Минск: Беларуская навука, 2019. – 315 с.
8. Логинов, В. Ф. Диагноз глобального климата / В. Ф. Логинов. – СПб., 2021. – 304 с.
9. Sepp, M. Long-term changes in the frequency of cyclones and their trajectories in Central and Northern Europe / M. Sepp, P. Post, J. Jaagus // Hydrology Research. – 2005. – Vol. 36, N 4–5. – P. 297–309. <https://doi.org/10.2166/nh.2005.0023>
10. Winter cyclone frequency and following freshet streamflow formation on the rivers in Belarus / I. Partasenok [et al.] // Environ. Res. Lett. – 2014. – Vol. 9, N 9. – Art. 095005. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/9/095005>
11. Логинов, В. Ф. Водный баланс речных водосборов / В. Ф. Логинов, А. А. Волчек. – Минск, 2006. – 160 с.
12. Гидрологический мониторинг Республики Беларусь / под ред. А. И. Полищука, Г. С. Чекана. – Минск, 2009. – 275 с.
13. Волчек, А. А. Водные ресурсы Беларуси и их прогноз с учетом изменения климата / А. А. Волчек, В. Н. Корнеев. – Брест, 2017. – 240 с.
14. Особенности формирования водности рек Беларуси в последние десятилетия / И. С. Данилович [и др.] // Природные ресурсы. – 2017. – № 2. – С. 5–12.
15. Стихийные гидрометеорологические явления на территории Беларуси: справочник / под ред. М. А. Гольберга. – Минск, 2002. – 132 с.

References

1. Pachauri R. K., Meyer L. A. *Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change: Synthesis Report* / IPCC, Core Writing Team. Geneva, 2014. 151 p.
2. Kryshnyakova V. S., Malinin V. N. Features of climate warming in the European territory of Russia in modern conditions *Obshchestvo. Sreda. Razvitie: Prirodnaya sreda* [Society. Environment. Development: Natural environment], 2007, no. 2, pp. 115–124 (in Russian).
3. Danilovich I. S., Loginov V. F. Current and expected climate change in Belarus. *Tsentral'noaziatskii zhurnal geograficheskikh issledovaniy* [Central Asian Journal of Geographical Research], 2021, no. 1–2, pp. 35–48 (in Russian).
4. *Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin* / BACC Author Team. Springer, 2015. 504 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-16006-1>
5. Jaagus J., Aasa A., Aniskevich S., Boincean B., Bojariu R., Briede A., Danilovich I., Castro F. D., Dumitrescu A., Labuda M., Labudová L., Löhmus K., Melnik V., Mõisja K., Pongracz R., Potopová V., Řezníčková L., Rimkus E., Semenova I., Stonevičius E., Štěpánek P., Trnka M., Vicente-Serrano S. M., Wibig J., Zahradníček P. Long-term changes in drought indices in Eastern and Central Europe. *International Journal of Climatology*, 2022, vol. 42, no. 1, pp. 225–249. <https://doi.org/10.1002/joc.7241>
6. Jacob D., Petersen J., Eggert B., Alias A., Christensen O. B., Bouwer L. M., Braun A., Colette A., Déqué M., Georgievski G., Georgopoulou E., Gobiet A., Menut L., Nikulin G., Haensler A., Hempelmann N., Jones C., Keuler K., Kovats S., Kröner N., Kotlarski S., Kriegsmann A., Martin E., van Meijgaard E., Moseley C., Pfeifer S., Preuschmann S., Radermacher C., Radtke K., Rechid D., Rounsevell M., Samuelsson P., Somot S., Soussana J.-F., Teichmann C., Valentini R., Vautard R., Weber B., Yiou P. EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*, 2014, vol. 14, no. 2, pp. 563–578. <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2>
7. Loginov V. F., Lysenko S. A. *Modern changes in the global and regional climate*. Minsk, 2019. 315 p. (in Russian).
8. Loginov V. F. *Global climate diagnosis*. Saint Petersburg, 2021. 304 p. (in Russian).
9. Sepp M., Post P., Jaagus J. Long-term changes in the frequency of cyclones and their trajectories in Central and Northern Europe. *Hydrology Research*, 2005, vol. 36, no. 4–5, pp. 297–309. <https://doi.org/10.2166/nh.2005.0023>
10. Partasenok I., Groisman R., Chekan G., Melnik V. Winter cyclone frequency and following freshet streamflow formation on the rivers in Belarus. *Environmental Research Letters*, 2014, vol. 9, no. 9, art. 095005. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/9/095005>
11. Loginov V. F., Volchek A. A. *Water balance of river catchments*. Minsk, 2006. 160 p. (in Russian).
12. Polishchuk A. I., Chekan G. S., eds. *Hydrological monitoring of the Republic of Belarus*. Minsk, 2009. 275 p. (in Russian).

13. Volchek A. A., Korneev V. N. *Water resources of Belarus and their forecast taking into account climate change*. Brest, 2017. 240 p. (in Russian).

14. Danilovich I. S., Zhuravovich L. N., Nagibina M. E., Kvach E. G. Features of the formation of the water content of the rivers of Belarus in recent decades. *Prirodnye resursy* [Natural resources], 2017, no. 2, pp. 5–12 (in Russian).

15. Golberg M. A., ed. *Natural hydrometeorological phenomena on the territory of Belarus: a reference book*. Minsk, 2002. 132 p. (in Russian).

Информация об авторах

Логонов Владимир Федорович – академик, д-р географ. наук, профессор, гл. науч. сотрудник. Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, Минск, Республика Беларусь). E-mail: info@nature-nas.by. ORCID: 0000-0002-0939-4160.

Данилович Ирина Сергеевна – канд. географ. наук, доцент, вед. науч. сотрудник. Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, Минск, Республика Беларусь). E-mail: irina-danilovich@yandex.ru. ORCID: 0000-0002-6792-7279.

Китаев Лев Михайлович – канд. географ. наук, ст. науч. сотрудник. Институт географии РАН (Старомонетный пер., 29, 119017, Москва, Российская Федерация). E-mail: lkitaev@mail.ru. ORCID: 0000-0020-0618-9209.

Акентьева Елена Марковна – канд. географ. наук, вед. науч. сотрудник. Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова (ул. Карбышева, 7, 194021, Санкт-Петербург, Российская Федерация). E-mail: eakentyeva@mail.ru. ORCID: 0000-0002-3395-4754.

Information about the authors

Loginov Vladimir F. – Academician, D. Sc. (Geography), Professor, Chief Researcher. Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skorina Str., 220076, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: info@nature-nas.by. ORCID: 0000-0002-0939-4160.

Danilovich Irina S. – Ph. D. (Geography), Associate Professor, Leading Researcher. Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skorina Str., 220076, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: irina-danilovich@yandex.ru. ORCID: 0000-0002-6792-7279.

Kitaev Lev M. – Ph. D. (Geography), Senior Researcher. Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences (29, Staromonetny bystr., 119017, Moscow, Russian Federation). E-mail: lkitaev@mail.ru. ORCID: 0000-0020-0618-9209.

Akent'eva Elena M. – Ph. D. (Geography), Leading Researcher. Voeikov Main Geophysical Observatory (7, Karbyshev Str., 194021, Saint Petersburg, Russian Federation). E-mail: eakentyeva@mail.ru. ORCID: 0000-0002-3395-4754.

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**TECHNICAL SCIENCES**

УДК 666.9-127+537.533.35

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-3-348-355>

Поступило в редакцию 19.02.2022

Received 19.02.2022

М. Ф. С. Х. Аль-Камали¹, А. А. Бойко¹, Х. А. С. Аль-Шаамири^{2,3}¹*Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого,
Гомель, Республика Беларусь*²*Университет Биша, Биша, Саудовская Аравия*³*Таузский университет, Тауз, Йемен***МИШЕНИ SiO₂ : CuO (Cu^o) ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК
ИОННО-ЛУЧЕВЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ, ПОЛУЧЕННЫЕ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ МЕТОДОМ***(Представлено академиком Н. К. Мышкиным)*

Аннотация. Проведены исследования особенностей структурообразования композиционных неорганических материалов, формируемых на основе диоксида кремния, а именно – пирогенного кремнезема марки А-380 (техническое название – аэросил). Изучена возможность улучшения однородности распределения вводимых веществ-допантов по поверхности SiO₂-глобул, образующих каркас ксерогеля. Указанная цель достигалась за счет однородности распределения легирующих солей (на примере нитрата меди) еще на стадии формирования золя, который переводился в состояние ксерогеля в результате последовательной термообработки в контролируемой газовой среде (на воздухе или осушенном водороде). Полученные материалы затем размалывали до состояния высокодисперсных микропорошков. Из порошков формовали мишени в виде таблеток требуемого размера методом одноосного пресования. Конечная форма образцов представляла собой или микропорошки, или таблетированные заготовки, полученные на их основе – диаметром порядка 12,5; 2,50; 30; 40 и 80 мм и фазового состава SiO₂:CuO и SiO₂:Cu^o.

Ключевые слова: ксерогель, микропорошки, термообработка, газовая среда, восстановление, морфология поверхности

Для цитирования. Аль-Камали, М. Ф. С. Х. Мишени SiO₂ : CuO (Cu^o) для нанесения тонких пленок ионно-лучевым распылением, полученные золь-гель методом / М. Ф. С. Х. Аль-Камали, А. А. Бойко, Х. А. С. Аль-Шаамири // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2022. – Т. 66, № 3. – С. 348–355. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-3-348-355>

Marwan F. S. H. Al-Kamali¹, Andrei A. Boika¹, Hamdan A. S. Al-Shamiri^{2,3}¹*Sukhoi State Technical University of Gomel, Gomel, Republic of Belarus*²*University of Bisha, Bisha, Saudi Arabia*³*Taiz University, Taiz, Yemen***SiO₂ : CuO (Cu^o) TARGETS FOR DEPOSITING THIN FILMS
OF ION-BEAM SPRAYING OBTAINED BY SOL-GEL METHOD***(Communicated by Academician Nikolay K. Myshkin)*

Abstract. Studies of the structure formation features of composite inorganic materials formed on the basis of silicon dioxide, namely, pyrogenic silica of the A-380 brand (technical name – aerosil). The main purpose of the research was to study the possibility of improving the uniformity of the distribution of injected dopants on the surface of SiO₂ globules forming the xerogel framework. This goal was achieved due to the uniformity of the distribution of alloying salts (for example, copper nitrate) at the stage of sol formation, which was converted to the state of xerogel as a result of sequential heat treatment in a controlled gas environment (air or dried hydrogen). The final shape of the samples was either micro-powders or tablet-shaped blanks obtained on their basis – with a diameter of about 12.5; 2.50; 30; 40 and 80 mm and a phase composition of SiO₂ : CuO and SiO₂ : Cu^o.

Keywords: xerogel, micro-powders, heat treatment, gas medium, restoration, surface morphology

For citation. Al-Kamali M. F. S. H., Boika A. A., Al-Shamiri H. A. S. $\text{SiO}_2 : \text{CuO}$ (Cu^0) targets for depositing thin films of ion-beam spraying obtained by sol-gel method. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2022, vol. 66, no. 3, pp. 348–355 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-3-348-355>

Введение. Одним из основных требований получения методами напыления в вакууме покрытий с оптимальной однородностью является высокая степень гомогенности гранулометрического и химического состава исходной мишени. Как было показано в [1], покрытия оптического качества и однородной стехиометрии получают только в режиме сильного «отравления» материала мишени при малой скорости распыления (т. е. когда на поверхности мишени находится тонкий слой диэлектрика). В нашем случае, используя для ее создания компоненты химической чистоты не ниже марки «осч», а также аэросил (в качестве матрицы-носителя веществ-допантов), становится возможным распределять легирующие добавки с однородностью на молекулярном уровне, сорбируя их на поверхность глобулы аэросила (пирогенного кремнезема) в виде тонкого слоя нанометровой толщины.

Пирогенный кремнезем является химически нейтральным материалом и может быть достаточно успешно применен при получении инертных матриц-носителей ряда веществ (в нашем случае в качестве исходного вещества-допанта выступал нитрат меди). Последующая термическая обработка таких материалов (ксерогелей, содержащих нитрат меди Cu(II)) в контролируемой газовой среде позволяла проводить реакции химической трансформации соли меди в ее оксид или восстановленную до металла, без реакции взаимодействия с SiO_2 -матрицей [2]. Подобные методы прямого восстановления в водороде солей металлов до состояния наночастиц описаны в [3]. Фактически, в структуре системы открытых и закрытых пор ксерогеля, как в нанореакторах, осуществляются реакции по получению оксида или металлической меди с последующей локализацией формирующейся фазы в виде агломератов микро- и наночастиц соответствующих соединений металла. В частности, достаточно эффективно на основе мезопористого материала типа кремнезем SBA-15, имеющий гексагонально-упорядоченный массив цилиндрических пор ($d = 6\text{--}27$ нм). В порах SBA-15 был реализован синтез наночастиц железа путем трансформации хлорида железа (III) в его оксид и восстановления до металла в токе водорода при 600 °C [4].

Целью проведенных научных исследований являлось изучение технологического процесса получения пористых SiO_2 -матриц, сформированных золь-гель методом на основе водной дисперсии аэросила марки А-380 и допированных ионами меди.

Материалы и методы исследования. Для получения мишеней использовался высокодисперсный кремнезем марки А-380, синтезированный в процессе гидролиза тетраоксида кремния в токе кислородно-водородного пламени при $T > 1000$ °C. Порошок аэросила содержат в себе примеси воды, хлористого водорода, некоторых оксидов и твердые крупные частицы двуокиси кремния (грит) [5]. На поверхности частиц диоксида кремния обычно находятся силанольные группы, тогда как связи $\equiv\text{Si}-\text{O}-\text{Si}\equiv$ локализованы внутри частиц. Ионы меди вводились в виде водорастворимой соли – нитрата меди $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$.

На первом этапе технологического процесса проводилось формирование золя, потом геля на его основе и, соответственно, ксерогеля. Вещества-допанты вводились в жидкий золь в виде водорастворимых солей заданной концентрации (в нашем случае использовался нитрат меди). Гелирование золя (чистого и содержащего медь) осуществлялось в открытых пластиковых формах на воздухе. Сушка сформировавшихся гелей проводилась в вентилируемом термошкафу при $T = 80$ °C. Для гомогенизации распределения веществ-допантов по объему конечных изделий было предложено проводить размалывание ксерогельных заготовок до порошков микронного и субмикронного размеров. Предполагалось, что в общем случае на их основе возможно получить композиционные заготовки различного геометрического профиля – путем компактирования с применением метода одноосного прессования. В процессе проведения синтеза соединений меди заданного стехиометрического состава, сформированные ксерогели подвергали поэтапной термообработке на воздухе (формировался композиционный материал $\text{SiO}_2 : \text{CuO}$), а затем в среде осушенного водорода (степень чистоты газа соответствовала марке «осч») осуществлялся

синтез композиционных материалов состава $\text{SiO}_2 : \text{Cu}^0$. Окончательные фазовые превращения в формируемых композиционных материалах проводились или на воздухе, или в среде водорода при $T = 800^\circ\text{C}$ (время выдержки синтезируемых микропорошков при указанной температуре составляло 1 ч). Полученные материалы затем размалывали до состояния высокодисперсных микропорошков. Из порошков формовали мишени в виде таблеток требуемого размера методом одноосного прессования. В качестве временной связки применялся водный раствор поливинилового спирта концентрацией 3–6 мас. % (концентрация зависела от типа конечного изделия и режима прессования). Давление в гидравлической системе прессы при получении образцов мишеней составляло порядка 120–125 кг/см². Таким образом были сформированы двойные металлооксидные системы состава $\text{SiO}_2 : \text{CuO}$ и $\text{SiO}_2 : \text{Cu}^0$, содержащие медь в атомном отношении $\text{Si} : \text{Cu} = 1 : 0,05; 1 : 0,1; 1 : 0,15; 1 : 0,5$ и предназначенные для получения таблетированных мишеней, применяемых при магнетронном распылении в вакууме [1; 6; 7]. На рис. 1 приводится принципиальная схема получения тонкодисперсных микропорошков состава $\text{SiO}_2 : \text{CuO}$ и $\text{SiO}_2 : \text{Cu}^0$.



Рис. 1. Основные этапы получения микропорошков составов $\text{SiO}_2 : \text{CuO}$ и $\text{SiO}_2 : \text{Cu}^0$

Fig. 1. Schematic diagram and main stages of obtaining micropowders of the composition $\text{SiO}_2 : \text{CuO}$ and $\text{SiO}_2 : \text{Cu}^0$

Результаты и их обсуждение. Методом рентгенофазового анализа изучались фазовые превращения, протекающие в материалах разработанного состава, а методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) – изменение морфологии поверхности внутри синтезированных ксерогельных заготовок. Установлено, что восстановленная медь, фактически, модифицирует внутреннюю структуру ксерогеля, образуя так называемое покрытие по всей поверхности SiO_2 -глобул. Наблюдаемый эффект, вероятно, связан с высокой концентрацией нитрата меди, вводимого в исходный SiO_2 -золь (соотношение атомов $\text{Si} : \text{Cu} = 1 : 1, 2 : 1, 3 : 1, 4 : 1$ и т. д.), а также высокой сорбционной способностью самой ксерогельной матрицы [4–6].

В общем случае, как для оксида меди, так и для восстановленной до металла формы, наблюдалась достаточно однородная картина распределения веществ-допантов по внутренней структуре SiO_2 -каркаса ксерогеля. Необходимо отметить, что отдельного образования микро- и наночастиц при указанном разрешении исследования морфологии поверхности ксерогелей методом СЭМ не обнаружено, однако восстановленная медь, вероятно, формирует 2D-покрытие по всей внутренней поверхности ксерогеля. Так, авторами работы [8] продемонстрирована возможность управления химическими связями на поверхности наночастиц благородного металла (для Ag^0). Нельзя исключать, что это покрытие может иметь структуру, сформировавшуюся из агломера-

тов частиц металла нанометрового размера, что будет являться целью наших последующих исследований. Гипотезу о формировании системы «ядро–оболочка» подтверждают данные просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), полученные для композиционных материалов состава $\text{SiO}_2 : \text{CuO}$ (рис. 2). Также интересны конечные функциональные (сенсорные) свойства подобных материалов, проявляемые, например, для пористых стекол, содержащих наночастицы серебра [9].

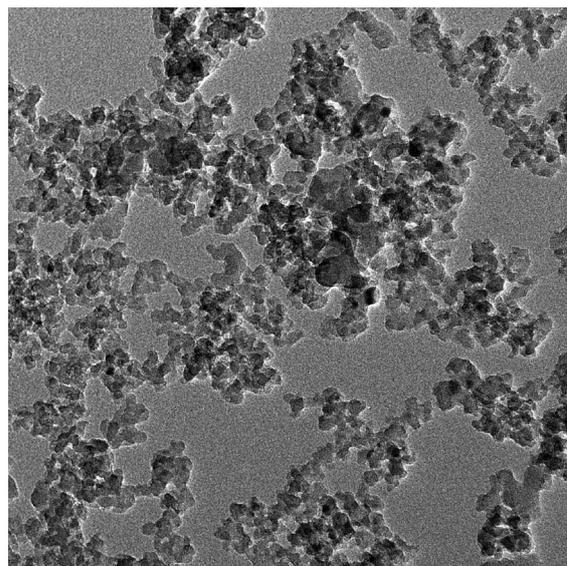
Все исходные микропорошки были получены с достаточно хорошей гомогенностью по составу, но при обработке в водороде наблюдались так называемые поверхностные эффекты, связанные с разницей в процессах восстановления открытой поверхности и поверхности, находящейся в непосредственном контакте со стенкой фарфоровой лодочки, в которую были помещены таблетированные мишени. Визуально это проявлялось в четко видимом цветовом градиенте – присутствовали контрастные зоны окрашивания в красный, ярко красный, пурпурный и т. д. цвета. Решением этой проблемы может стать формовка мишеней из микропорошков, уже прошедших восстановительную обработку в водороде и спеченных далее в нейтральной газовой среде (например, в аргоне).

Изучение морфологии поверхности синтезированных образцов проводилось для центральной части разломанного SiO_2 -ксерогеля указанного на рисунках состава, на растровом электронном микроскопе модели S-4800 (производства фирмы Hitachi, Япония) с разрешением 1 нм. Исследования проводились сотрудниками НТЦ «Белмикросистемы» филиала «Белмикросистемы» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

С целью изучения характера взаимодействия веществ-допантов с поверхностью глобул SiO_2 -каркаса ксерогеля были приготовлены три типа образцов, предназначенных для исследования морфологии их поверхности методом СЭМ: $\text{SiO}_2 : \text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$; $\text{SiO}_2 : \text{CuO}$ и $\text{SiO}_2 : \text{Cu}^0$ (рис. 3).

Видна четко выраженная глобулярная структура ксерогелей и высокая однородность их исходной морфологии, причем крупные глобулярные агрегаты, формирующие каркас ксерогеля, образованы, в свою очередь, первичными частицами аэросила, имеющими гораздо меньший размер (для А-380 – порядка 5–15 нм, согласно имеющимся паспортным данным). Из-за высокой степени гидратации соль нитрата меди буквально «забивает» межглобулярное и межпоровое пространство ксерогеля (рис. 3, а). Формирование на основе таких ксерогелей матриц состава $\text{SiO}_2 : \text{CuO}$ снова возвращает «рельеф» структуре ксерогеля, что говорит о взаимной химической инертности фаз SiO_2 и CuO (рис. 3, б). Трансформация оксида меди $\text{Cu}(\text{II})$ в состояние восстановленного металла «выравнивает» общую структуру ксерогеля (рис. 3, с, микрофотография для шкалы увеличения в 0,3 мкм).

Вероятно, что в этом случае происходит сорбция восстановленного металла в структуру SiO_2 -глобул с проявлением так называемого 2D-наноэффекта – в виде образования оболочки металла на SiO_2 -поверхности (с градиентом концентрации от внешнего к внутреннему слою). Можно сделать предположение о том, что модифицированные подобным образом ксерогели и микропорошки из этих ксерогелей будут обладать наиболее эффективным распределением веществ-допантов, что позволит создавать на их основе таблетированные материалы, обладающие оптимальной однородностью распределения концентрации восстановленного металла по всей глубине формируемых матриц. Подобные методы получения золь-гель коллоидных систем



1-SiO₂:CuO
Print Mag: 478000x @ 7.0 in
4:12:44 p
20 nm
HV=200.0kV
Direct Mag: 60000x
USIF-AMU

Рис. 2. ПЭМ-изображение для микропорошка ксерогеля состава $\text{SiO}_2 : \text{CuO}$, термообработка на воздухе при $T = 800^\circ\text{C}$ в течение 1 ч

Fig. 2. TEM image for micro-powder of xerogel composition $\text{SiO}_2 : \text{CuO}$, heat treatment in air at $T = 800^\circ\text{C}$ for 1 h

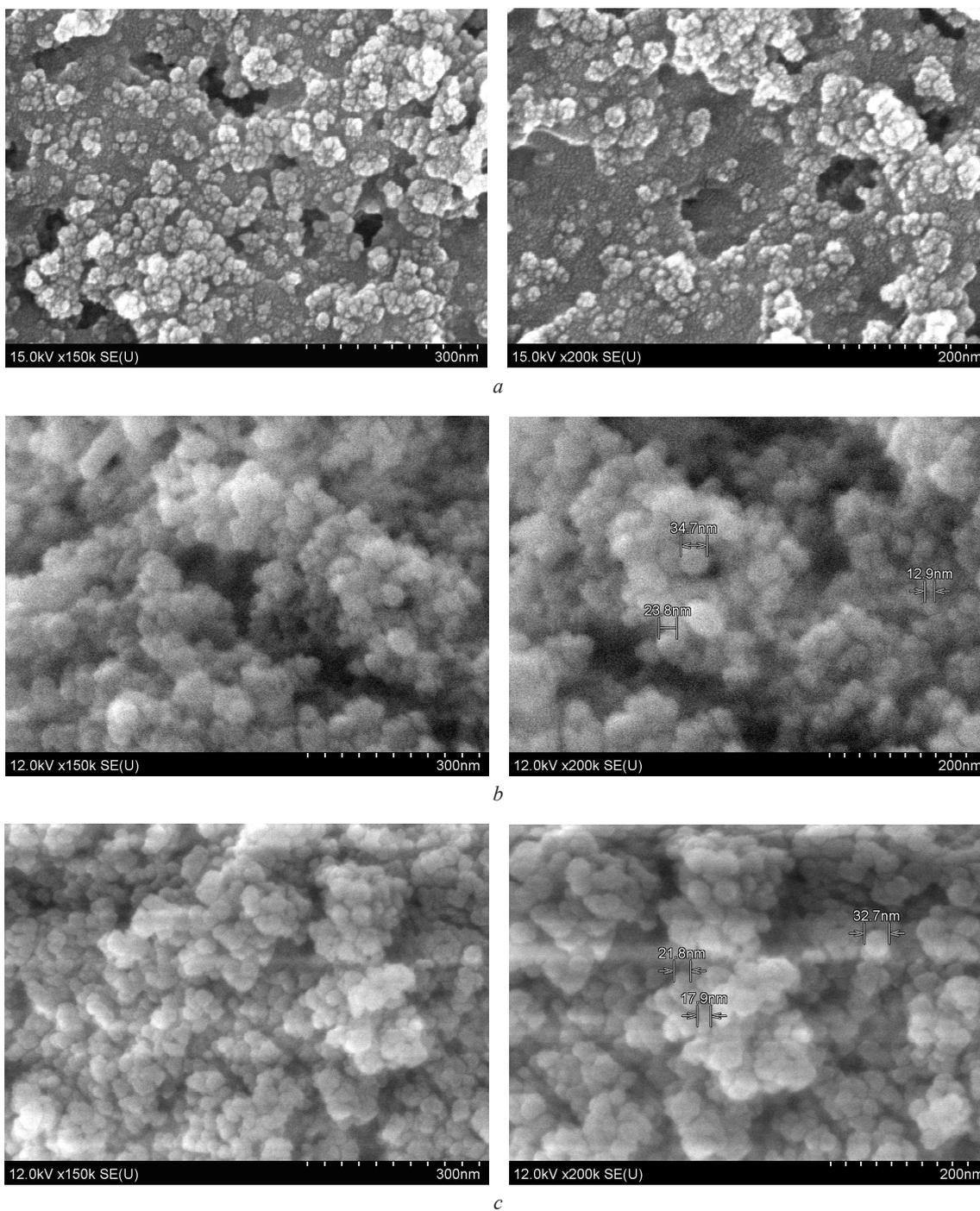


Рис. 3. SEM-изображения поверхности ксерогеля, сформированного на основе водной дисперсии аэросила А-380 и нитрата меди. Концентрация нитрата меди относительно содержания 1 моля SiO_2 в 79 мл золя 0,40 мол. % нитрат меди: *a* – сушка в течение 7 дней при температуре $T = 80$ °C. Фазовый состав ксерогеля – $\text{SiO}_2 : \text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$; *b* – отжиг на воздухе при $T = 800$ °C в течение 1 ч. Фазовый состав ксерогеля – $\text{SiO}_2 : \text{CuO}$; *c* – отжиг в среде водорода при $T = 800$ °C в течение 1 ч. Фазовый состав ксерогеля – $\text{SiO}_2 : \text{Cu}^\circ$

Fig. 3. SEM-images of the surface of a xerogel formed on the basis of an aqueous dispersion of aerosilaerosil A-380 and copper nitrate. The concentration of copper nitrate relative to the content of 1 mole of SiO_2 in 79 ml of sol is 0.40 mol. % copper nitrate: *a* – drying for 7 days at a temperature of $T = 80$ °C. Phase composition of xerogel is $\text{SiO}_2 : \text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$; *b* – annealing in air at $T = 800$ °C for 1 h. The phase composition of the xerogel is $\text{SiO}_2 : \text{CuO}$; *c* – annealing in a hydrogen medium at $T = 800$ °C for 1 h. The phase composition of the xerogel is $\text{SiO}_2 : \text{Cu}^\circ$

(с применением аэросилов) в настоящее время достаточно широко используются для создания керамических или оптических материалов [10; 11], причем подчеркивается наличие в используемых твердых наполнителях собственной системы пор [12], что приводит к существенному повышению температуры спекания гелей и ксерогелей до монолитного стеклообразного состояния.

Для исследования фазового состава поверхности синтезированных образцов проводилось для центральной части SiO_2 -ксерогелей, для синтезированных образцов наноструктурированных микропорошков методами рентгенодифракционного анализа с помощью рентгеновского многофункционального дифрактометра GNR APD 2000 PRO исследования проводились сотрудниками «БелЦЗМ» Института механики металлополимерных систем им. В. А. Белого.

Для определения фазового состава представлены рентгенограммы как исходных веществ, так и композиционных материалов, сформированного на основе водной дисперсии аэросила А-380 и нитрата меди (отожженного на воздухе, а затем в среде водорода при $T = 800\text{ }^\circ\text{C}$, 1 ч). На рис. 4 представлены дифрактограммы микропорошков SiO_2 -ксерогелей, сформированных на основе водной дисперсии аэросила А-380 и нитрата меди (отожженного на воздухе, а также в среде водорода при $T = 800\text{ }^\circ\text{C}$, 1 ч). Видно, что в составе микропорошок SiO_2 сохраняет аморфное состояние, а CuO и Cu^0 сохраняет моноклинную кристаллическую сингонию. Это было отмечено авторами [13].

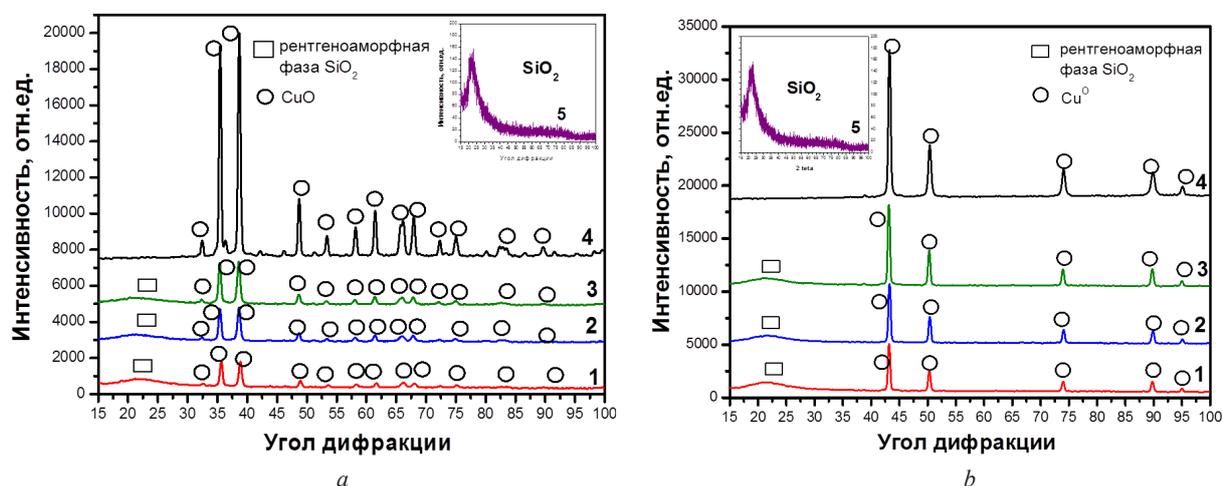


Рис. 4. Дифрактограммы ксерогеля, сформированного на основе водной дисперсии аэросила А-380 и нитрата меди. Концентрация ионов меди относительно содержания 1 моля SiO_2 : 1 – 0,20 мол. %; 2 – 0,30 мол. %; 3 – 0,40 мол. %; 4 – эталонный спектр оксида меди (а) и металлической меди (б) степени химической чистоты «чда»; 5 – чистый SiO_2 -ксерогель, отожженный на воздухе: а – отожженного на воздухе при $T = 800\text{ }^\circ\text{C}$, 1 ч; б – отожженного на воздухе, а затем в среде водорода при $T = 800\text{ }^\circ\text{C}$, 1 ч

Fig. 4. X-ray diffractograms of a xerogel formed on the basis of an aqueous dispersion of aerosil A-380 and copper nitrate. The concentration of copper ions relative to the content of 1 mole of SiO_2 : 1 is 0.20 mol. %; 2 – 0.30 mol. %; 3 – 0.40 mol. %; 4 – reference spectrum of copper oxide (a) and metallic copper (b) degree of chemical purity «чда»; 5 – pure SiO_2 -xerogel annealed in air: a – annealed in air at $T = 800\text{ }^\circ\text{C}$, 1 h; b – annealed in air, and then in a hydrogen medium at $T = 800\text{ }^\circ\text{C}$, 1 h

Общее (и изначально высокое) количество вещества-допанта «размазывается» по их поверхности, не позволяя установить механизм фазообразования в реакциях окисления или восстановления, протекающих для исходной соли меди, взятой в виде ее нитрата и введенной в структуру ксерогеля.

Подтверждением данного предположения служит тот факт, что 1 г аэросила марки А-380, который использовался для приготовления золя, по паспортным данным обладает удельной поверхностью порядка $380\text{ м}^2/\text{г}$. Для всех видов SiO_2 -ксерогелей, полученных на основе таких наполнителей, сохраняется как глобулярная структура, так и наличие системы закрытых и открытых пор [4; 14; 15].

Заключение. В результате проведенных исследований получены следующие научно-технические результаты:

показано, что в общем случае, наночастицы металлов в матрице ксерогеля представляют собой наноструктурированные объекты, обладающие высокой химической и «проникающей» активностью относительно протекания термически стимулированных поверхностных реакций;

разработаны технологические приемы синтеза композиционных ксерогельных заготовок состава $\text{SiO}_2 : \text{CuO}$ и $\text{SiO}_2 : \text{Cu}^0$. Сделаны предположения по оптимизации однородности распределения веществ-допантов по структуре SiO_2 -матрицы (путем ее размола до состояния микропорошков) и методах формирования на основе веществ разработанного состава композиционных заготовок заданной геометрической формы;

методом СЭМ изучен механизм распределения соединений меди по структуре формируемых ксерогелей. Установлено, что условия сушки и последующей термообработки SiO_2 -матрицы в контролируемой газовой среде позволяют перераспределять концентрацию вводимой меди по объему ксерогельной заготовки;

показано, что в фазовый состав композита сохраняет SiO_2 -матрицу в аморфном состоянии, а CuO и Cu^0 сохраняет моноклинную кристаллическую сингонию.

Таким образом, наиболее значимой областью практического применения высокопористых SiO_2 -порошков, допированных отдельно локализованными микро- и наночастицами восстановленных металлов, это мишени для нанесения покрытий методами электронно-лучевого или магнетронного напыления.

Благодарности. Работа выполнена в рамках задания 2.2.6 ГПНИ «Конвергенция-2025» (подпрограмма «Микромир, плазма и Вселенная»), финансируемого из средств республиканского бюджета по государственным программам научных исследований на 2021–2025 гг. в Республике Беларусь.

Acknowledgements. The work was carried out within the framework of task 2.2.6 of the state research program “Convergence-2025” (subprogram “Microcosm, plasma and the Universe”), funded from the republican budget for state research programs for 2021–2025 in the Republic of Belarus.

Список использованных источников

1. Вольпян, О. Д. Магнетронное нанесение оптических покрытий при питании магнетронов переменным напряжением средней частоты / О. Д. Вольпян, А. И. Кузьмичев // Прикладная физика. – 2008. – № 3. – С. 34–52.
2. Investigation of sol-gel processed CuO/SiO_2 nanocomposite as a potential photoanode material / T. Tenkyong [et al.] // Materials Science-Poland. – 2015. – Vol. 33, N 4. – P. 826–834. <https://doi.org/10.1515/msp-2015-0097>
3. Порозова, С. Е. Получение наночастиц и наноматериалов: учеб. пособие / С. Е. Порозова, В. Б. Кульметьева. – Пермь, 2010. – 135 с.
4. Подденежный, Е. Н. Золь-гель синтез оптического кварцевого стекла / Е. Н. Подденежный, А. А. Бойко. – Гомель, 2002. – 210 с.
5. Арбенин, А. Ю. Синтез наночастиц железа в порах мезопористого кремнезема SBA-15 и анализ химического состава / А. Ю. Арбенин, Е. Г. Земцова, В. М. Смирнов // Вестн. СПбГУ: Физика и химия. – 2012. – Вып. 4. – С. 136–138.
6. Вилья, Н. Формирование пленок оксида титана методом реактивного магнетронного распыления / Н. Вилья, Д. А. Голосов, Т. Д. Нгуен // Доклады БГУИР. – 2019. – № 5(123). – С. 87–93. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2019-123-5-87-93>
7. Андрусишина, И. Н. Наночастицы металлов: способы получения, физико-химические свойства, методы исследования токсикологичности / И. Н. Андрусишина // Современные проблемы токсикологии. – 2011. – № 3. – С. 5–14.
8. Оленин, А. Ю. Химическое модифицирование поверхности наночастиц серебра. Получение частиц-янусов / А. Ю. Оленин, Т. Р. Низамов, Г. В. Лисичкин // Рос. нанотехнологии. – 2014. – Т. 9, № 9–10. – С. 19–24.
9. Porous glasses with silver nanoparticles as the sensitive material for sensors to measure the index of refraction of analytes / A. S. Pshenova [et al.] // Journal of Optical Technology. – 2016. – Vol. 83, N 7. – P. 438–440. <https://doi.org/10.1364/jot.83.000438>
10. Аль-Камали, М. Ф. С. Х. Структурообразование SiO_2 -ксерогелей, содержащих соединения меди различного фазового состава / М. Ф. С. Х. Аль-Камали, А. А. Алексеенко, О. А. Титенков // Проблемы физики, математики и техники. – 2020. – № 3(44). – С. 7–12.
11. Алексеенко, А. А. Синтез и свойства ксерогелей состава $\text{SiO}_2 : \text{Cu}^0$, предназначенных для применения в биомедицинских исследованиях / А. А. Алексеенко, М. Ф. С. Х. Аль-Камали, О. А. Титенков // Вестн. ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2020. – № 3–4. – С. 40–47.
12. Preparation of Cu- SiO_2 composite aerogel by ambient drying and the influence of synthesizing conditions on the structure of the aerogel / G. A. Li [et al.] // Chinese Science Bulletin. – 2011. – Vol. 56, N 7. – P. 685–690. <https://doi.org/10.1007/s11434-011-4413-3>
13. Theivasanthi, T. X-Ray Diffraction Studies of Copper Nanopowder / T. Theivasanthi, M. Alagar // Scholars Research Library, Archives of Physics Research. – 2010. – Vol. 1, N 2. – P. 112–117.

14. Малявский, Н. И. Золь-гель синтез ортосиликатов / Н. И. Малявский, Б. В. Покидько // Вестн. МГСУ. – 2012. – № 8. – С. 131–138.

15. Tohidi, S. H. Comparison nanostructure behavior of copper species on the silica matrix xerogels / S. H. Tohidi // IJE Transactions B: Applications. – 2011. – Vol. 24, N 2. – P. 147–153.

References

1. Volpian O. D., Kuzmichev A. I. Magnetron deposition of optical coatings with magnetron power supply by mid-frequency alternative voltage. *Prikladnaya Fizika = Applied Physics*, 2008, no. 3, pp. 34–52 (in Russian).

2. Tenkyong T., Bachan N., Raja J., Kumar P. N., Shyla J. M. Investigation of sol-gel processed CuO/SiO₂ nanocomposite as a potential photoanode material. *Materials Science-Poland*, 2015, vol. 33, no. 4, pp. 826–834. <https://doi.org/10.1515/msp-2015-0097>

3. Porozova S. E., Kulmets'eva V. B. *Production of nanoparticles and nanomaterials: study guide*. Perm, 2010. 135 p. (in Russian).

4. Poddenezhny E. N., Boiko A. A.. *Sol-gel synthesis of optical quartz glass*. Gomel, 2002. 210 p. (in Russian).

5. Arbenin A. Yu., Zemtsova E. G., Smirnov V. M. Synthesis of iron nanoparticles in mesoporous silica sba-15 and chemical composition analysis. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Fizika i khimiya = Vestnik of Saint Petersburg University. Physics and Chemistry*, 2012, vol. 4, pp. 136–138 (in Russian).

6. Villa N., Golosov D. A., Nguyen T. D. Formation of titanium oxide thin films by reactive magnetron sputtering. *Doklady BGUIR*, 2019, no. 5 (123), pp. 87–93 (in Russian). <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2019-123-5-87-93>

7. Andrusishina I. N. Metal nanoparticles: methods of production, physico-chemical properties, methods of toxicology research. *Sovremenyye problemy toksikologii [Modern Problems of Toxicology]*, 2011, no. 3, pp. 5–14 (in Russian).

8. Olenin A. Y., Nizamov T. R., Lisichkin G. V. Chemical modification of the surfaces of silver nanoparticles: synthesis of janus particles. *Nanotechnologies in Russia*, 2014, vol. 9, no. 9–10, pp. 467–473. <https://doi.org/10.1134/s1995078014050103>

9. Pshenova A. S., Klyukin D. A., Sidorov A. I., Andreeva O. V. Porous glasses with silver nanoparticles as the sensitive material for sensors to measure the index of refraction of analytes. *Journal of Optical Technology*, 2016, vol. 83, no. 7, pp. 438–440. <https://doi.org/10.1364/jot.83.000438>

10. Al-Kamali M. F. S. H., Alexeenko A. A., Titenkov O. A. Structure formation of SiO₂-xerogels containing copper compounds of different phase composition. *Problemy fiziki, matematiki i tehniki = Problems of Physics, Mathematics and Technics*, 2020, no. 3(44), pp. 7–12 (in Russian).

11. Alekseenko A. A., Al-Kamali M. F. S. H., Titenkov O. A. Synthesis and properties of xerogels of composition SiO₂ : Cu^o, intended for application in biomedical research. *Vestnik GGTU im. P. O. Sukhogo [Bulletin of GSTU im. P. O. Sukhoi]*, 2020, no. 3–4, pp. 40–47 (in Russian).

12. Li G. A., Zhu T. L., Deng Z. X., Zhang Y. J., Jiao F., Zheng H. R. Preparation of Cu–SiO₂ composite aerogel by ambient drying and the influence of synthesizing conditions on the structure of the aerogel. *Chinese Science Bulletin*, 2011, vol. 56, no. 7, pp. 685–690. <https://doi.org/10.1007/s11434-011-4413-3>

13. Theivasanthi T., Alagar M. X-Ray Diffraction Studies of Copper Nanopowder. *Scholars Research Library, Archives of Physics Research*, 2010, vol. 1, no. 2, pp. 112–117.

14. Malyavskiy N. I., Pokidko B. V. Sol-gel synthesis of orthosilicates. *Vestnik MGSU*, 2012, no. 8, pp. 131–138 (in Russian).

15. Tohidi S. H. Comparison nanostructure behavior of copper species on the silicamatrix xerogels. *IJE Transactions B: Applications*, 2011, vol. 24, no. 2, pp. 147–153.

Информация об авторах

Аль-Камали Марван Ф. С. Х. – соискатель мл. науч. сотрудника. Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого (ул. Пр-т Октября, 48, 246029, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: marwan.ye2@gmail.com.

Бойко Андрей Андреевич – д-р техн. наук, доцент, проректор. Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого (ул. Пр-т Октября, 48, 246029, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: boiko@gstu.by.

Аль-Шамири Хамдан А. С. – д-р наук (физика), доцент. Университет Биша (Саудовская Аравия); Университет Таиз (Республика Йемен).

Information about the authors

Al-Kamali Marwan F. S. H. – External doctorate student Junior Researcher. Sukhoi State Technical University of Gomel (48, Pr. Octiabria Str., 246029, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: marwan.ye2@gmail.com.

Boika Andrei A. – D. Sc. (Engineering), Assistant Professor, Vice Rector. Sukhoi State Technical University of Gomel (48, Pr. Octiabria Str., 246029, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: boiko@gstu.by.

Al-Shamiri Hamdan A. S. – D. Sc. (Physics), Associate Professor. Bisha University (Saudi Arabia); Taiz University (Republic of Yemen).

Член-корреспондент В. В. Рубаник¹, Ю. В. Царенко¹, Дж. Т. Вонг², Ю. В. Ли²

¹*Институт технической акустики Национальной академии наук Беларуси,
Витебск, Республика Беларусь*

²*Нанкинский университет науки и технологии, Нанкин, Китайская Народная Республика*

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ, ПОДВЕРГНУТЫХ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Аннотация. Описано оригинальное устройство для получения наноструктурных материалов методом интенсивной пластической деформации с наложением ультразвуковых колебаний, которое обеспечивает измельчение структуры материала заготовки и исключает возникновение дефектов на ее поверхности и в торцевых областях. Этот эффект достигается за счет использования кольцевой прокладки, выполненной в виде полого волновода резонансной длины, закрепленного на неподвижной опоре в узле смещений, соединенного с концентратором и ультразвуковым преобразователем. Исследованы физико-механические свойства наноструктурных образцов никеля и меди после ультразвуковой обработки (УЗО). Показано, что УЗО наноструктурных образцов приводит к повышению их пластических свойств и незначительному снижению предела прочности. При малых амплитудах механических напряжений в пределах 17,5 МПа в образцах меди и никеля наблюдается заметный рост микротвердости. Дальнейшее увеличение амплитуды механических напряжений при ультразвуковой обработке до 100 МПа приводит к снижению микротвердости.

Ключевые слова: нанометаллы, ультразвуковая обработка, пластическая деформация, микротвердость, предел прочности

Для цитирования. Влияние ультразвуковой обработки на механические свойства металлов, подвергнутых интенсивной пластической деформации / В. В. Рубаник [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2022. – Т. 66, № 3. – С. 356–364. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-3-356-364>

Corresponding Member Vasili V. Rubanik¹, Yury V. Tsarenko¹, Jing T. Wang², Yu W. Liu²

¹*Institute of Technical Acoustics of the National Academy of Sciences of Belarus, Vitebsk, Republic of Belarus*

²*Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, People's Republic of China*

INFLUENCE OF ULTRASONIC PROCESSING ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF METALS SUBJECTED TO INTENSE PLASTIC DEFORMATION

Abstract. An original device for production of nanostructured materials by the method of severe plastic deformation with the imposition of ultrasonic vibrations is described, which provides the grinding of the structure of the material of the workpiece and eliminates the occurrence of defects on its surface and in the end areas. This effect is achieved through the use of an annular spacer made in the form of a hollow waveguide of resonant length, fixed on a fixed support in the displacement unit, connected to a concentrator and an ultrasonic transducer. The physical-mechanical properties of nanostructured samples of nickel and copper after ultrasonic treatment (UST) have been studied. It is shown that UST of nanostructured samples leads to an increase in their plastic properties and a slight decrease in the tensile strength. At small amplitudes of mechanical stresses within 17.5 MPa, a noticeable microhardness increase is observed in copper and nickel samples. A further increase in the mechanical stress amplitude up to 100 MPa during ultrasonic treatment leads to a microhardness decrease.

Keywords: nanometals, ultrasonic treatment, plastic deformation, microhardness, ultimate strength

For citation. Rubanik V. V., Tsarenko Yu. V., Wang J. T., Liu Yu W. Influence of ultrasonic processing on the mechanical properties of metals subjected to intense plastic deformation. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2022, vol. 66, no. 3, pp. 356–364 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-3-356-364>

Введение. Формирование ультрамелкозернистой (УМЗ) и нанокристаллической (НС) структур методами интенсивного пластического деформирования (ИПД) дает возможность радикально влиять как на деформационное поведение, так и на механические свойства металлов и сплавов, что позволяет считать ИПД весьма перспективным методом управления их структурой

и физико-механическими свойствами. Большой интерес к наноструктурированным материалам обусловлен их уникальными физическими и механическими свойствами: прочностью, пластичностью, износостойкостью, проводимостью и др. [1–3]. В силу того, что ультрамелкозернистые и нанокристаллические материалы появились сравнительно недавно, их устойчивость к внешним энергетическим воздействиям, в частности, к пластической деформации и ультразвуковой обработке (УЗО) изучена пока недостаточно, также не изучены процессы получения и способы последующей обработки таких материалов.

Общим для УМЗ и НС материалов, полученных деформационными методами объемного наноструктурирования, является то, что их микроструктура неравновесна (метастабильна). Электронно-микроскопические исследования показывают диффузный дифракционный контраст границ зерен в УМЗ и НС материалах, свидетельствующий о наличии высоких внутренних напряжений. Источниками этих напряжений являются неравновесные границы зерен, сформировавшиеся в процессе интенсивной пластической деформации металла [2; 4].

Несмотря на то что нанометаллы имеют высокую прочность, значительно превышающую прочность обычных металлов, их деформационная упрочняющая способность и пластичность низки. Высокая плотность кристаллических дефектов и значительная запасенная энергия приводят к низкой термической стабильности и электропроводности нанометаллов, что ограничивает область их применения. Материаловеды предлагают различные методы обработки наноструктурированных материалов, такие как неполный рекристаллизационный отжиг, градиентная деформация и др., чтобы получить гетерогенную микроструктуру в металле, и тем самым оптимизировать соотношение прочности, пластичности и электропроводности.

К настоящему времени исследователями накоплен большой опыт по интенсификации процессов обработки металлов давлением (ОМД) и изменению физико-механических свойств материалов с помощью ультразвуковых колебаний [5–7], т. е. ультразвуковое воздействие можно осуществлять как в процессе деформации металлов и сплавов, так и подвергать ультразвуковой обработке материалы после различных видов пластической деформации. Обработка металлов давлением с наложением ультразвуковых колебаний широко используется после открытия Блаха и Лангенекером акустопластического эффекта, заключающегося в резком снижении напряжения пластического течения металла при ультразвуковом воздействии [8]. Однако работ по применению ультразвукового контроля в процессах интенсивной пластической деформации практически нет. Это обусловлено в первую очередь трудностью ввода ультразвуковых колебаний в очаг деформации. Так, в [9] ультразвуковое воздействие на деформируемый металл при равноканальном угловом протягивании (РКУП) осуществляли непосредственно через пуансон или волновод, расположенный в дополнительном канале матрицы и контактирующий с деформируемым металлом в зоне сопряжения входного и выходного каналов. Эффективность ультразвукового воздействия при такой схеме РКУП невысокая, что и подтверждается результатами данного исследования.

Ультразвуковое воздействие на металлы эффективно и для интенсивной пластической деформации при равноканальном угловом протягивании. Такой способ позволяет снизить силы трения, что приводит к изменению условий течения металла и оказывает влияние на его физико-механические свойства [5], и, самое главное, получать протяженные изделия, например, проволоку. Как уже отмечалось, с помощью ультразвуковой обработки можно существенно улучшить физико-механические свойства металлов после интенсивной пластической деформации в УМЗ и НС состоянии. Так, нами впервые было показано, что УЗО является эффективным способом релаксации структуры сильно деформированных материалов, которая повышает долю большеугловых границ зерен, релаксацию неравновесных границ и тройных стыков зерен, не приводя к значительному росту зерен, при этом эффект релаксации структуры зависит от амплитуды ультразвука. Установлен эффект роста пластичности никеля, полученного методом РКУП после УЗО, происходящий одновременно с ростом предела текучести и предела прочности никеля, что может иметь практически важное значение для повышения комплекса механических свойств наноматериалов [10].

Целью данной работы является разработка метода деформационного измельчения структуры в протяженных материалах t-NPS способом с использованием ультразвуковых колебаний, а также

установление закономерностей изменения структуры, механических свойств ультрамелкозернистых материалов при ультразвуковой обработке.

Материалы и методы исследования. Основой способа получения ультрамелкозернистой структуры материалов послужил метод ИПД кручением под высоким давлением [3]. Однако данный метод не позволяет получать протяженные образцы с однородными физико-механическими свойствами. Поэтому нами выбран способ интенсивной пластической деформации, называемый «tube high-pressure shearing (t-HPS)», при котором процесс сдвига обусловлен трением между инструментом и образцом под высоким гидростатическим давлением, при этом плоскость сдвига параллельна радиусу конического образца во время процесса [11; 12]. Принцип обработки металла при t-HPS деформировании заключается в том, что образец находится под высоким всесторонним давлением (рис. 1).

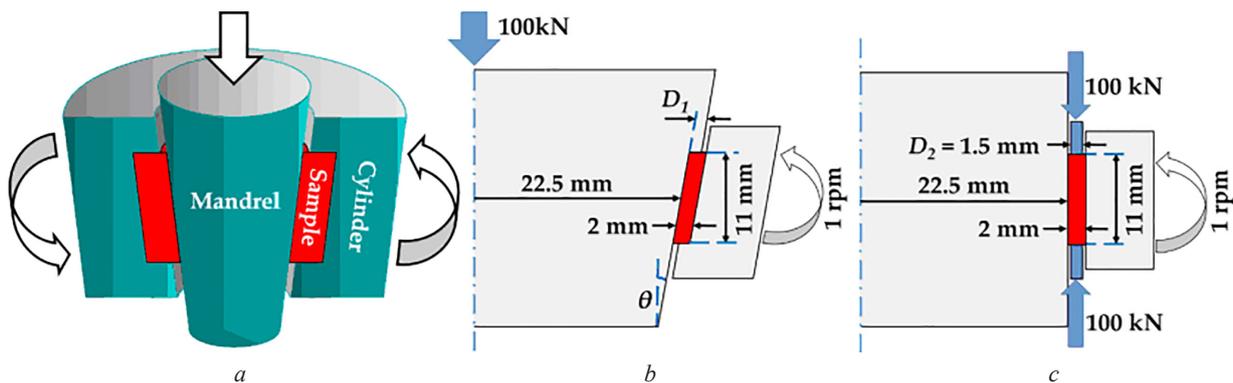


Рис. 1. Принципы и геометрия инструмента высокого давления (t-HPS): *a* – схема создания давления t-HPS с помощью эффекта клина; *b* – геометрия t-HPS давления с помощью клинового эффекта с углом в половину конуса θ и глубиной вогнутости цилиндра D_1 ; *c* – схема t-HPS устройства при герметизации концов образца кольцами D_2 [11; 12]

Fig. 1. Principles and geometry of the high pressure tool (t-HPS): *a* – the scheme of creating the t-HPS pressure using the wedge effect; *b* – t-HPS pressure geometry using a wedge effect with a half-cone angle θ and a cylinder concavity depth D_1 ; *c* – scheme of the t-HPS device when sealing the ends of the sample with D_2 rings [11; 12]

Трубчатый образец находится между оправкой и цилиндром (конусом) под высоким гидростатическим давлением, действующим на его боковые стенки, так что силы трения на границе между оправкой образца или цилиндром достаточно велики, чтобы предотвратить любое проскальзывание их относительно друг друга. Зафиксировав оправку и вращая цилиндр или наоборот оправку, в образце создается простой сдвиг. Оправка подвергается осевой нагрузке, которая преобразуется в нормальное усилие на контактных поверхностях между оправкой и цилиндром. При этом за счет действия клина в образце создается высокое гидростатическое давление.

Недостатком данного устройства является низкое качество поверхности получаемых изделий, а также возникновение микротрещин и разрывов в месте их контакта с кольцевыми прокладками. Это обусловлено как высокими силами трения между получаемым изделием и оснасткой (оправкой и основанием), так и пластическим течением обрабатываемого материала вблизи кольцевых прокладок. Контакт поверхности обрабатываемой заготовки с поверхностями устройства обработки в условиях высокого давления и сдвига приводит к схватыванию материала заготовки с материалом оснастки, что влечет возникновение задиров на поверхности полученного изделия. Сдвиг материала на поверхности заготовки в одном и том же направлении при увеличивающемся давлении приводит вначале к росту количества дислокаций в структуре материала заготовки, которые при дальнейшем сдвиге приводят к образованию границ раздела зерен и измельчению материала, и далее, вблизи кольцевых прокладок, вследствие наличия возможности пластического течения материала – к образованию микротрещин. Возникновению микротрещин и их дальнейшему росту также способствует неизменное направление действующих сил, поэтому любая возникшая микротрещина быстро расширяется. Все это приводит к необходимости дополнительной механической обработки получаемых изделий, обрезке краев и, соответственно, увеличенному расходу материала.

Нами разработано устройство (рис. 2) для изготовления полых конических заготовок, которое содержит сопряженные по форме и выполненные с возможностью вращения друг относительно друга оправку и основание конической формы, снабженные верхней и нижней кольцевыми прокладками для предотвращения выдавливания заготовки, и расположенный соосно с ними гидропривод, соединенный с основанием¹.

Разработанное устройство дополнительно содержит полый волновод резонансной длины, закрепленный на неподвижной опоре в узле ультразвуковых колебаний, соединенный последовательно с концентратором и ультразвуковым преобразователем, при этом верхняя кольцевая прокладка жестко соединена с основанием или выполнена с ним заодно в виде пояска, а нижняя кольцевая прокладка выполнена заодно с полым волноводом. Преимущество предложенного устройства заключается в постоянном изменении локального направления сдвига, что предупреждает зарождение и развитие микротрещин в материале обрабатываемой заготовки. Кроме того, дополнительная энергия, получаемая материалом заготовки за счет ультразвуковых колебаний, расходуется на измельчение его структуры и в результате повышает качество получаемого изделия.

Постоянное изменение направления сдвига приводит к невозможности образования микротрещин и их дальнейшему росту, так как разрушение отдельных зерен обрабатываемого материала фиксируется на стадии образования границ зерен, т. е. измельчения структуры материала. Микротрещины наиболее легко зарождаются на границе зерен в том случае, когда направление внешних сил является нормальным к этой границе, и они действуют в течение времени, достаточного для перестройки кристаллической структуры. Поэтому быстрое изменение направления сдвига при возбуждении ультразвуковых колебаний в заготовке предотвращает образование в ней микротрещин.

Кроме того, возбуждение ультразвуковых колебаний в заготовке предотвращает ее схватывание с материалом оснастки. Постоянная вибрация не позволяет сблизиться атомам контактирующих материалов на расстояние, необходимое для образования химической связи. Даже если такое схватывание происходит в силу наличия высокого давления, эти связи тут же разрушаются из-за постоянного изменения направления сдвига. Качество поверхности получаемой детали существенно возрастает.

Возбуждение в обрабатываемой заготовке колебаний в процессе обработки достигается за счет ее контакта с волноводом, соединенным с ультразвуковым преобразователем через концентратор. Наличие концентратора, выполнение волновода резонансной длины и его фиксация на неподвижной опоре в узле колебаний обеспечивают максимальный коэффициент передачи энергии ультразвуковых колебаний от источника материалу заготовки. Полая форма волновода обусловлена формой обрабатываемой заготовки и экономией материала волновода. Наилучшие экспериментальные результаты были получены в случае, когда верхняя кольцевая прокладка жестко соединялась с основанием или выполнялась с ним заодно в виде пояска, а нижняя кольцевая прокладка выполнялась заодно с полым волноводом. Именно такая конструкция исключает затухание ультразвука в обрабатываемой заготовке и повышает эффективность измельчения кристаллической структуры.

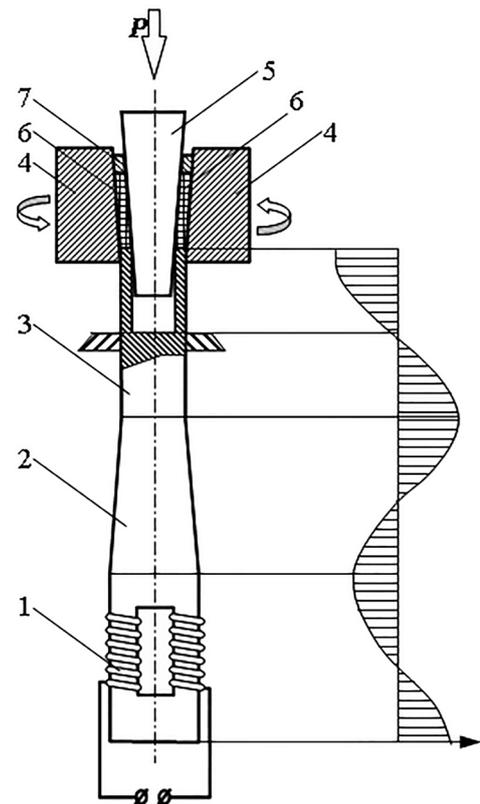


Рис. 2. Устройство для t-HPS обработки металлов с наложением ультразвука

Fig. 2. Device for t-HPS processing of metals with superposition of ultrasound

¹ Устройство для изготовления полых конических деталей: патент ВУ 12828 / В. В. Рубаник, Ю. В. Царенко, Цз. Т. Ван, Чж Ли. – Оpubл. 28.02.2022.

Устройство (рис. 2) состоит из ультразвукового преобразователя 1, концентратора ультразвуковых колебаний 2, соединенного с ним полого волновода 3 резонансной длины, закрепленного на неподвижной опоре в узле колебаний. Между вращающейся оправкой 4 и основанием 5 помещена обрабатываемая заготовка 6, кольцевая прокладка 7 жестко соединена с основанием 5. Полный волновод 3 составляет с нижней кольцевой прокладкой одно целое.

Процесс интенсивной пластической деформации металлической заготовки осуществляется следующим образом. Между оправкой 4 и основанием 5 помещают обрабатываемую заготовку 6 в форме трубки, которую поджимают к кольцевой прокладке 7 и торцу полого волновода 3. К основанию 5 прикладывают внешнее давление P от гидропривода и через привод осуществляют вращение оправки 4. Ультразвуковые колебания от преобразователя 1 посредством концентратора ультразвуковых колебаний 2 (трансформатора амплитуды) передаются на полный волновод 3 и далее на торцевую поверхность обрабатываемой заготовки 6, выполненной в форме кольца. Возбуждение ультразвуковых колебаний в полом волноводе 3 приводит к постоянному изменению направления сдвига на границах раздела обрабатываемой заготовки 6 с оправкой 4 и основанием 5, что облегчает измельчение структуры материала заготовки и препятствует возникновению дефектов на ее поверхности и в торцевых областях.

Данным способом интенсивной пластической деформации получены полосы наноструктурированного никеля и меди, из которых были вырезаны образцы размерами 10×10 мм² для последующей ультразвуковой обработки.

Для релаксации структуры образцов наноструктурных никеля и меди методом ультразвукового воздействия с точки зрения эффективности знакопеременного механического воздействия использован способ, в котором обработку образцов осуществляли в пучности механических напряжений стоячей волны волновода в закрепленном состоянии [13]. Для этого образец материала после ИПД закреплялся внутри полости волновода в пучности напряжений с помощью специального винта, обеспечивающего надежный акустический контакт между волноводом и обрабатываемым образцом. Питание преобразователя ПМС15А-18 осуществляли от ультразвукового генератора УЗГ2-4М. Обработка наноструктурных образцов выполнялась при различных усилиях их поджатия в пучности осциллирующих напряжений волновода. Амплитуду механических напряжений в образцах изменяли от 17,5 до 100 МПа.

В работе были исследованы физико-механические свойства образцов никеля и меди в наноструктурном состоянии до и после ультразвуковой обработки при различных значениях амплитуды знакопеременных напряжений.

Механические свойства образцов определяли на микротвердомере по методу микро-Виккерса типа HVS-1000Z (TIME Group Inc., Китай), который предназначен для проведения измерений на образцах малых размеров. Испытания производили путем вдавливания алмазного индентора пирамидальной формы в поверхность образца с испытательным усилием 0,98 Н. Встроенный микропроцессор HVS-1000 позволяет автоматически проводить испытание с отображением величины твердости на ЖКИ.

Результаты и их обсуждение. О прочностных свойствах образцов, полученных методом t-NPS интенсивной пластической деформации, судили по измерениям микротвердости по методу Виккерса (таблица).

Анализ результатов, представленных в таблице, показывает, что при малых амплитудах ультразвука (17,5 МПа) наблюдается заметный рост микротвердости наноструктурных образцов как меди, так и никеля. Дальнейшее увеличение интенсивности ультразвуковой обработки до 50 МПа приводит к снижению микротвердости исследованных нанометаллов до уровня образцов без УЗО. После обработки образцов при амплитуде УЗО 100 МПа наблюдается снижение микротвердости меди и никеля соответственно на 6 и 4,5 % по сравнению с образцами без ультразвуковой обработки.

Результаты механических испытаний образцов наномеди и наноникеля на растяжение (рис. 3 и 4) показали, что относительное удлинение образцов, испытанных растяжением после УЗО, имеет более высокие значения до 16 %. Кривая 3 на графике характеризует образцы после отжига, т. е. находящиеся в крупнозернистом состоянии. Относительное удлинение отожженных образцов меди превышает 50 %, предел прочности при этом не достигает 250 МПа.

Микротвердость образцов наномеди и наноникеля

Microhardness of nickel and copper samples

Режим обработки образца Sample processing mode	Амплитуда УЗО, МПа Amplitude of ultrasonic treatment, MPa	HV, МПа
Nano-Cu	без УЗО	1514
Nano-Cu + УЗО	17,5	1653
Nano-Cu + УЗО	35	1580
Nano-Cu + УЗО	50	1532
Nano-Cu + УЗО	70	1503
Nano-Cu + УЗО	100	1413
Nano-Ni	без УЗО	4370
Nano-Ni + УЗО	17,5	4927
Nano-Ni + УЗО	35	4730
Nano-Ni + УЗО	50	4327
Nano-Ni + УЗО	70	4205
Nano-Ni + УЗО	100	4170

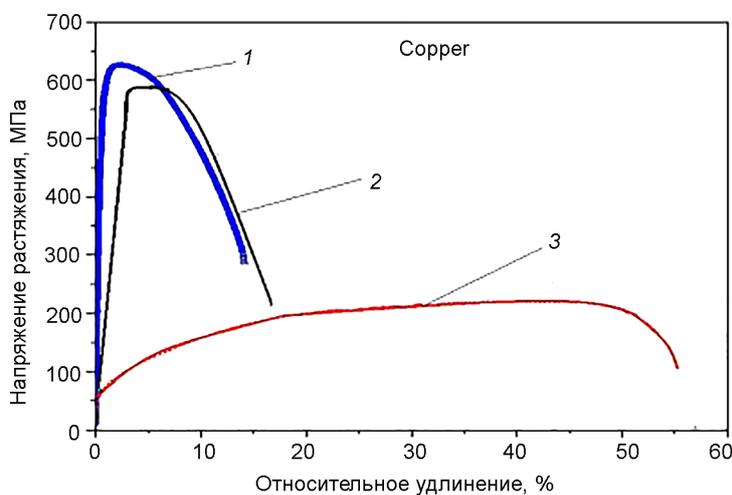


Рис. 3. Кривые растяжения образцов наномеди: 1 – исходный (без УЗО); 2 – после УЗО 70 МПа; 3 – после отжига

Fig. 3. Curves stretching samples of nanocopper: 1 – source (without UST); 2 – after UST 70 MPa; 3 – after annealing

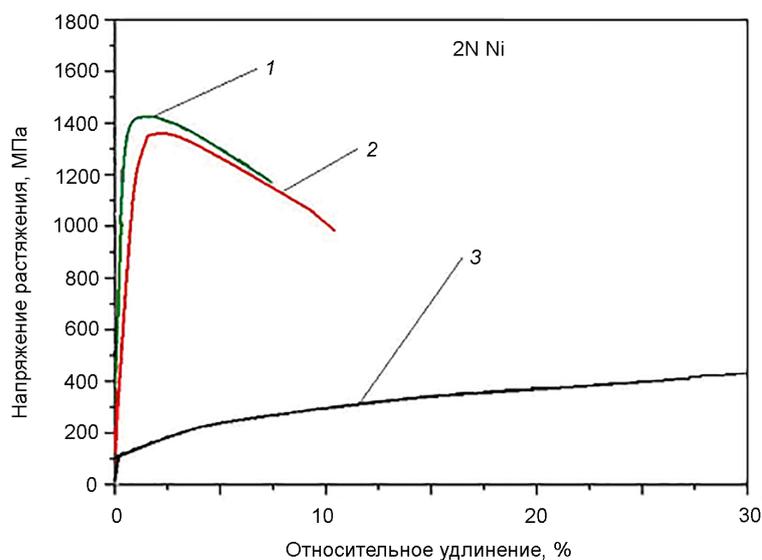


Рис. 4. Кривые растяжения образцов наноникеля: 1 – без УЗО; 2 – после УЗО 70 МПа; 3 – после отжига

Fig. 4. Nanonickel samples stretching curves: 1 – without UST; 2 – after UST 70 MPa; 3 – after annealing

Как видно из рис. 3, предел прочности образцов наномеди без УЗО несколько выше, чем после УЗО с амплитудой знакопеременных напряжений 70 МПа, что, скорее всего, связано с эффектом релаксации дислокационных и неравновесных границ зерен, который зависит от интенсивности ультразвука.

Воздействие ультразвука с амплитудой, значительно превышающей предел текучести материала, способно разрушать дислокационные границы и приводит к генерации новых дислокаций, их накоплению в границах зерен, приводя тем самым не к снижению, а к росту внутренних напряжений. Амплитуда знакопеременных напряжений 70 МПа существенно ниже предела текучести наноматериала, поэтому происходит усовершенствование структуры [7; 10].

Исследования показали, что предел прочности образцов наноникеля (рис. 4) без УЗО несколько выше, чем после обработки ультразвуком, что вызвано снижением внутренних напряжений под действием ультразвука путем релаксации дислокационных границ и неравновесных границ зерен.

Следует отметить, что уровень прочностных свойств для никеля выше 1200 МПа является высоким результатом для этого металла. Относительное удлинение при этом образцов, испытанных растяжением после УЗО, имеет более высокие значения, достигая значения 11 %. В то время как у образцов без УЗО эта величина составляет около 7,5 %.

Представляет интерес поведение обработанного ультразвуком наноструктурного никеля при последующем отжиге. Известно, что степень неравновесности поликристалла оказывает значительное влияние на его термическую стабильность. Ввиду этого, УМЗ и НС металлы, полученные ИПД и характеризующиеся неравновесной структурой границ зерен, обладают низкой термостабильностью структуры и свойств. Снижение избыточной энергии границ зерен, их кривизны замедляют рост зерен.

На рис. 5 видно, что нагрев до 120–150 °С незначительно снижает значение микротвердости образцов наномеди независимо от вида обработки, что может быть связано с процессами возврата.

После отжига при 180–220 °С микротвердость образцов снижается существенно, более чем на 30 % по сравнению с микротвердостью исходных образцов меди с ультрамелкозернистой структурой. Такое резкое снижение величины микротвердости свидетельствует о протекании процесса рекристаллизации, что подтверждается ранее проведенными структурными исследованиями на УМЗ никеле [7; 14]. Повышение температуры отжига до 270 °С приводит к дальнейшему снижению микротвердости и к приближению ее до значений, характерных для отожженной меди. Из графика видно, что наибольшая термическая устойчивость образцов наномеди наблюдается после ультразвуковой обработки при амплитуде механических напряжений 17,5 МПа.

В данном случае, поскольку УЗО привела к релаксации внутренних напряжений, наблюдается определенное повышение термостабильности: начало аномального роста зерен при отжиге

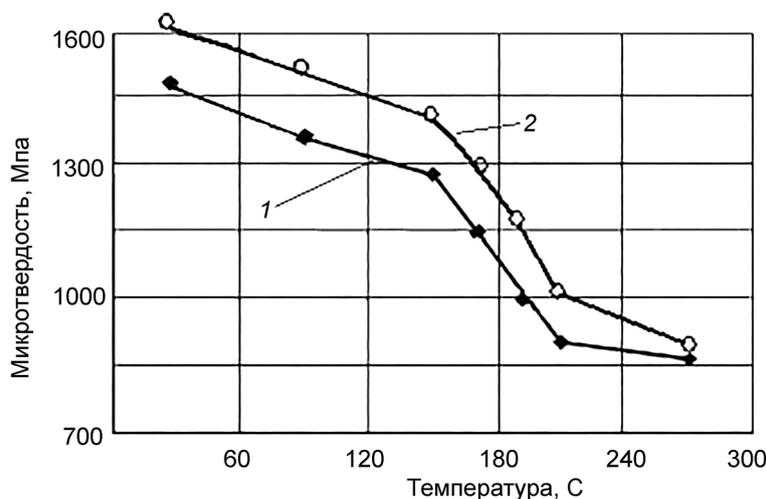


Рис. 5. Изменение микротвердости образцов наномеди после нагрева: 1 – без УЗО; 2 – после УЗО 17,5 МПа

Fig. 5. Changes in the microhardness of the nanomed samples after heating: 1 – without UST; 2 – after UST 17.5 MPa

смещается примерно на 30–40 °С в сторону более высоких температур. Наиболее значительным в этом отношении является влияние обработки с амплитудой 40 МПа. Однако видно, что этот результат не коррелирует с зависимостью эффекта снижения внутренних напряжений от амплитуды. В противном случае следовало бы ожидать максимального увеличения термостабильности после УЗО с амплитудой 140 МПа. Поэтому нельзя утверждать, что единственным фактором, оказывающим влияние на термостабильность УМЗ никеля, является степень неравновесности границ зерен и наличие дальнедействующих напряжений, создаваемых ими. Возможно, необходимо учитывать образование вакансий при воздействии ультразвука на материал. Повышение числа вакансий и их кластеров, очевидно, вносит свой вклад в изменение термостабильности УМЗ материала.

Заключение. Разработано устройство для получения наноструктурных материалов с наложением ультразвуковых колебаний методом t-NPS, содержащее вращающуюся оправку и конус, находящийся под внешним давлением, между которыми располагается трубчатая заготовка, кольцевые прокладки, установленные с верхнего и нижнего концов заготовки, при этом кольцевая прокладка выполнена в виде полого волновода резонансной длины, закрепленного на неподвижной опоре в узле смещений, соединенного с концентратором и ультразвуковым преобразователем, при этом верхняя кольцевая прокладка жестко соединена с конусом. Предложенное устройство позволяет повысить качество поверхности получаемых изделий, а также устранить возникновение микротрещин и разрывов в месте их контакта с кольцевыми прокладками, устраняется необходимость дополнительной механической обработки получаемых изделий, обрезка краев и, соответственно, увеличенный расход материала.

Результаты исследований физико-механических свойств наноструктурных образцов никеля и меди после ультразвуковой обработки показали, что после такой обработки наблюдается повышение пластических свойств и незначительное снижение предела прочности. Показано, что при малых амплитудах напряжений ультразвука до 17,5 МПа наблюдается заметный рост микротвердости наноструктурных образцов как меди, так и никеля, а дальнейшее увеличение интенсивности ультразвуковой обработки до 100 МПа приводит к снижению микротвердости.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант Т19КИТГ-003).

Acknowledgement. The work has been financially supported by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (grant T19KITG-003).

Список использованных источников

1. Valiev, R. Z. Structure and properties of ultra fine-grained materials produced by severe plastic deformation / R. Z. Valiev, A. V. Korznikov, R. R. Mulyukov // *Materials Science and Engineering*. – 1993. – Vol. A168, N 2. – P. 141–148. [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(93\)90717-s](https://doi.org/10.1016/0921-5093(93)90717-s)
2. Носкова, Н. И. Субмикроструктурные и нано-кристаллические металлы и сплавы / Н. И. Носкова, Р. Р. Мухомов. – Екатеринбург, 2003. – 279 с.
3. Бриджмен, П. В. Исследование больших пластических деформаций и разрыва / П. В. Бриджмен. – М., 1955. – 444 с.
4. Zhilyaev, A. P. Using high-pressure torsion for metal processing: Fundamentals and applications / A. P. Zhilyaev, T. G. Langdon // *Progr. Mater. Sci.* – 2008. – Vol. 53, N 6. – P. 893–979. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2008.03.002>
5. Рубаник, В. В. Влияние ультразвука на физико-механические свойства проволоки при равноканальном угловом протягивании / В. В. Рубаник, Ю. В. Царенко // *Докл. Нац. акад. наук Беларуси*. – 2020. – Т. 64, № 1. – С. 94–102. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-1-94-102>
6. Hanges in the Microstructure and Mechanical Properties of Nanomaterials under an Ultrasonic Wave Effect / A. A. Nazarov [et al.] // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. – 2014. – Vol. 43, N 2. – P. 153–159. <https://doi.org/10.3103/s1052618814020113>
7. Microstructure changes in ultrafine-grained nickel processed by high pressure torsion under ultrasonic treatment / A. A. Samigullina [et al.] // *Ultrasonics*. – 2018. – Vol. 82. – P. 313–321. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2017.09.005>
8. Blaha, F. Dehnung von Zink-Kristallen unter Ultraschalleinwirkung / F. Blaha, B. Langenecker // *Naturwissenschaften*. – 1955. – Vol. 42, N 20. – P. 556. <https://doi.org/10.1007/bf00623773>
9. Ultrasonic assisted – ECAP / F. Djevanroodi [et al.] // *Ultrasonics*. – 2013. – Vol. 53, N 6. – P. 1089–1096. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2013.02.003>
10. Effect of Ultrasonic Treatment on the Strength and Ductility of Bulk Nanostructured Nickel Processed by Equal-Channel Angular Pressing / A. A. Samigullina [et al.] // *Rev. on Advanced Materials Science*. – 2014. – Vol. 39, N 1. – P. 48–53.
11. Investigation on the Strain Distribution in Tube High-Pressure Shearing / J. Meng [et al.] // *Metals*. – 2019. – Vol. 9, N 10. – Art. 1117. <https://doi.org/10.3390/met9101117>
12. Principles of severe plastic deformation using tube high-pressure shearing / J. T. Wang [et al.] // *Scr. Mater.* – 2012. – Vol. 67, N 10. – P. 810–813. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2012.07.028>

13. Ультразвуковая обработка нанометаллов, полученных деформационными методами / Ю. В. Царенко [и др.] // Актуальные проблемы прочности: материалы Междунар. науч. конф., Витебск, 25–29 мая 2020 г. / под ред. В. В. Рубаника. – Молодечно, 2020. – С. 366–368.

14. Effect of ultrasonic treatment on the microstructure and properties of nanostructured nickel processed by high pressure torsion / A. A. Nazarova [et al.] // *Materials Science Forum*. – 2010. – Vol. 667–669. – P. 605–609. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.667-669.605>

References

1. Valiev R. Z., Korznikov A. V., Mulyukov R. R. Structure and properties of ultra fine-grained materials produced by severe plastic deformation. *Materials Science and Engineering*, 1993, vol. A168, no. 2, pp. 141–148. [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(93\)90717-s](https://doi.org/10.1016/0921-5093(93)90717-s)
2. Noskova N. I., Mulyukov R. R. *Submicrocrystalline and nanocrystalline metals and alloys*. Yekaterinburg, 2003. 279 p. (in Russian).
3. Bridgman P. W. *Studies in Large Plastic Flow and Fracture*. New York; London, McGraw-Hill, 1952. 362 p.
4. Zhilyaev A. P., Langdon T. G. Using high-pressure torsion for metal processing: Fundamentals and applications. *Progress in Materials Science*, 2008, vol. 53, no. 6, pp. 893–979. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2008.03.002>
5. Rubanik V. V., Tsarenko Yu. V. Ultrasound influence on the physical and mechanical properties of wire at equal-channel angular broaching. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2020, vol. 64, no. 1, pp. 94–102 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-1-94-102>
6. Nazarov A. A., Samigullina A. A., Mulyukov R. R., Tsarenko Yu. V., Rubanik V. V. Changes in the microstructure and mechanical properties of nanomaterials under an ultrasonic wave effect. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2014, vol. 43, no. 2, pp. 153–159. <https://doi.org/10.3103/s1052618814020113>
7. Samigullina A. A., Mukhametgalina A. A., Sergeev S. N., Zhilyaev A. P., Nazarov A. A., Zagidullina Yu. R., Parkhimovich N. Yu., Rubanik V. V., Tsarenko Yu. V. Microstructure changes in ultrafine-grained nickel processed by high pressure torsion under ultrasonic treatment. *Ultrasonics*, 2018, vol. 82, pp. 313–321. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2017.09.005>
8. Blaha F., Langenecker B. Dehnung von Zink-Kristallen unter Ultraschalleinwirkung. *Naturwissenschaften*, 1955, vol. 42, no. 20, p. 556 (in German). <https://doi.org/10.1007/bf00623773>
9. Djavanroodi F., Ahmadian H., Koohkan K., Naseri R. Ultrasonic assisted-ECAP. *Ultrasonics*, 2013, vol. 53, no. 6, pp. 1089–1096. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2013.02.003>
10. Samigullina A. A., Nazarov A. A., Mulyukov R. R., Tsarenko Yu. V., Rubanik V. V. Effect of Ultrasonic Treatment on the Strength and Ductility of Bulk Nanostructured Nickel Processed by Equal-Channel Angular Pressing. *Reviews on Advanced Materials Science*, 2014, vol. 39, no. 1, pp. 48–53.
11. Meng J., Li Z., Liu Y., Zhu Y. B., Wang S., Lin K., Tao J. Q., Wang J. T. Investigation on the Strain Distribution in Tube High-Pressure Shearing. *Metals*, 2019, vol. 9, no. 10, art. 1117. <https://doi.org/10.3390/met9101117>
12. Wang J. T., Li Z., Wang J., Langdon T. G. Principles of severe plastic deformation using tube high-pressure shearing. *Scripta Materialia*, 2012, vol. 67, no. 10, pp. 810–813. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2012.07.028>
13. Tsarenko Yu. V., Rubanik V. V., Lutsko V. F., Samoletov V. G., Wang J. T., Liu Yu. Ultrasonic treatment of nanometals obtained by deformation methods. *Aktual'nye problemy prochnosti: materialy Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii, Vitebsk, 25–29 maya 2020 goda* [Actual problems of strength: materials of the International Scientific Conference, Vitebsk, May 25–29, 2020]. *Molodechno*, 2020, pp. 366–368 (in Russian).
14. Nazarova A. A., Mulyukov R. R., Tsarenko Yu. V., Rubanik V. V., Nazarov A. A. Effect of ultrasonic treatment on the microstructure and properties of nanostructured nickel processed by high pressure torsion. *Materials Science Forum*, 2010, vol. 667–669, pp. 605–609. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.667-669.605>

Информация об авторах

Рубаник Василий Васильевич – член-корреспондент, д-р техн. наук, заведующий лабораторией. Институт технической акустики НАН Беларуси (пр. Генерала Людникова, 13, 210009, Витебск, Республика Беларусь). E-mail: ita@vitebsk.by.

Царенко Юрий Валентинович – канд. техн. наук, заместитель директора по научно-инновационной работе. Институт технической акустики НАН Беларуси (пр. Генерала Людникова, 13, 210009, Витебск, Республика Беларусь). E-mail: labpt@vitebsk.by.

Ванг Джинг Тао – профессор обработки материалов, заместитель директора. Институт Герберта Глейтера, Нанкинский университет науки и технологии (163, Xianlin Road, Qixia District, Nanjing, Jiangsu Province, 210023). E-mail: jtwangcn@163.com.

Лио Ювель – научный сотрудник. Факультет материаловедения и инженерии. Нанкинский университет науки и технологии (163, Xianlin Road, Qixia District, Nanjing, Jiangsu Province, 210023). E-mail: liuyw_working@163.com.

Information about the authors

Rubanik Vasily V. – Corresponding Member, D. Sc. (Engineering), Head of the Laboratory. Institute of Technical Acoustics of the National Academy of Sciences of Belarus (13, General Ludnikov Ave., 210009, Vitebsk, Republic of Belarus). E-mail: ita@vitebsk.by.

Tsarenko Yury V. – Ph. D. (Engineering), Deputy Director for Research and Innovation. Institute of Technical Acoustics of the National Academy of Sciences of Belarus (13, General Ludnikov Ave., 210009, Vitebsk, Republic of Belarus). E-mail: labpt@vitebsk.by.

Wang Jing Tao – Professor of Materials Processing, SMSE Vice Director. Herbert Gleiter Institut, Nanjing University of Science & Technology (163, Xianlin Road, Qixia District, Nanjing, Jiangsu Province, 210023). E-mail: jtwangcn@163.com.

Liu Yu Weil – Research associate. School of Materials Science and Engineering. Nanjing University of Science & Technology (163, Xianlin Road, Qixia District, Nanjing, Jiangsu Province, 210023). E-mail: liuyw_working@163.com.

ISSN 1561-8323 (Print)
ISSN 2524-2431 (Online)

УДК 544.463+546.562'62'723-31'742'832'+661.666
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-3-365-376>

Поступило в редакцию 16.05.2022
Received 16.05.2022

**В. И. Жорник¹, Т. Ф. Григорьева², С. А. Ковалева¹, Т. Ю. Киселева³, Е. Т. Девяткина²,
С. В. Восмериков², И. С. Веремей¹, академик РАН Н. З. Ляхов²**

¹*Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь*

²*Институт химии твердого тела и механохимии Сибирского отделения Российской академии наук,
Новосибирск, Российская Федерация*

³*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация*

МЕХАНИЧЕСКИ СТИМУЛИРОВАННЫЕ РЕАКЦИИ В СИСТЕМАХ МЕТАЛЛ–ОКСИД (КАРБИД)

(Представлено академиком П. А. Витязем)

Аннотация. Методами мессбауэровской и ИК-спектроскопии, рентгеноструктурного анализа, в том числе с использованием синхротронного излучения, и электронной микроскопии изучены процессы механохимического восстановления оксидов железа, никеля и меди алюминием при стехиометрическом соотношении компонентов и в смесях с двух-, трех- и четырехкратным превышением содержания алюминия над стехиометрическим, а также в присутствии избытка оксидобразующего металла и твердых растворов алюминия в железе и меди. Определены условия, при которых могут быть получены металлы (железо, никель, медь) и их моноалюминиды, модифицированные оксидом алюминия. При трехкратном избытке алюминия формируются алюминиды с большим содержанием алюминия. При четырехкратном увеличении содержания алюминия механохимическое восстановление оксидов не происходит. Предпочтительным способом модифицирования металлов оксидом алюминия является механохимическое восстановление оксидов твердым раствором алюминия в металле, образующем оксид. Методами рентгеновской дифракции и электронной микроскопии изучено механохимическое взаимодействие в высокоэнергетической системе Hf–C в присутствии 20, 30 и 50 мас. % меди. Показано, что с увеличением содержания меди в системе Hf–C–Cu уменьшается размер кристаллитов образующегося карбида гафния.

Ключевые слова: механически стимулированные реакции, механохимическое восстановление, оксид железа, железо, твердый раствор алюминия в железе, оксид никеля, оксид меди, твердый раствор алюминия в меди, алюминий, механохимический синтез, гафний, углерод, медь, карбид гафния

Для цитирования. Механически стимулированные реакции в системах металл–оксид (карбид) / В. И. Жорник [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2022. – Т. 66, № 3. – С. 365–376. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-3-365-376>

**Viktor I. Zhornik¹, Tatiana F. Grigoreva², Svetlana A. Kovaliova¹, Tatyana Yu. Kiseleva³, Evgeniya T. Devyatkina²,
Sergey V. Vosmerikov², Ilya S. Veremey¹, Academician RAS Nikolay Z. Lyakhov²**

¹*Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

²*Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russian Federation*

³*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation*

MECHANICALLY STIMULATED REACTIONS IN METAL–OXIDE (CARBIDE) SYSTEMS

Abstract. The processes of mechanochemical reduction of oxides of iron, nickel, and copper with aluminum with a stoichiometric ratio of components and in mixtures with a two-, three-, and four-fold excess of the aluminum content over the stoichiometric, as well as in the presence of an excess of oxide-forming metal and solid solutions of aluminum in iron and copper, were studied by the Mössbauer and IR spectroscopy, X-ray diffraction analysis, including the use of synchrotron radiation, and electron microscopy. The conditions for formation of metals modified with aluminum oxide (iron, nickel, copper) and their monoaluminides are determined. High aluminum content aluminides are formed at a three-fold excess of aluminum, and at a four-fold excess, a mechanochemical reduction of oxides does not occur. The preferred method for modifying metals with alumina is the mechanochemical reduction of oxides with a solid solution of aluminum in the oxide-forming metal. Mechanochemical interaction in the high-energy Hf–C system in the presence of 20, 30, and 50 wt. % copper leads to the formation of hafnium carbide; and with an increase in the copper content, the crystallite size decreases.

Keywords: mechanically stimulated reactions, mechanochemical reduction, iron oxide, iron, solid solution of aluminum in iron, nickel oxide, copper oxide, solid solution of aluminum in copper, aluminum, mechanochemical synthesis, hafnium, carbon, copper, hafnium carbide

For citation. Zhornik V. I., Grigoreva T. F., Kovaliova S. A., Kiseleva T. Yu., Devyatkina E. T., Vosmerikov S. V., Veremey I. S., Lyakhov N. Z. Mechanically stimulated reactions in metal–oxide (carbide) systems. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2022, vol. 66, no. 3, pp. 365–376 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-3-365-376>

Введение. В настоящее время широко используются для повышения физико-механических и эксплуатационных свойств металлов и их сплавов механизмы дисперсного упрочнения материалов добавками высокодисперсных оксидов, карбидов, боридов и др. Введение их в металлический расплав меди, никеля, железа, алюминия в малом количестве способствует повышению твердости, износостойкости материалов за счет увеличения количества центров кристаллизации и формирования мелкозернистой структуры. Увеличение количества наполнителя приводит к формированию композитов с металломатричной структурой, свойства определяются распределением армирующего наполнителя, уровнем межфазной связи, наличием продуктов взаимодействия и пр., что зависит от смачивания вводимого наполнителя матричным расплавом, условий замешивания и последующей обработки. В связи с этим смачивание определяет прочность адгезионных связей, и в случае его отсутствия между частицами упрочняющей фазы и расплавленной матрицей на границе раздела образуются поры, что является причиной снижения прочностных характеристик материала и его пластичности. Большинство керамических добавок характеризуются низкой смачиваемостью, что в ряде случаев требует плакирования карбидных и/или оксидных фаз металлами.

Одним из перспективных методов получения таких порошков является механохимический синтез. В условиях интенсивных механических воздействий в механореакторах реализуются различные физико-химические процессы, приводящие к изменению структурного состояния веществ с формированием большой контактной поверхности, их перемешиванию и интенсификации химических реакций. Химические взаимодействия могут быть реализованы в локальных объемах вещества в процессе каждого соударения как с постепенным характером превращения, так и с зажиганием реакции горения в объеме смеси с высокой скоростью протекания (механически стимулированные самораспространяющиеся реакции). Одним из возможных типов химического взаимодействия с протеканием реакций горения являются окислительно-восстановительные реакции в экзотермических системах оксидов и активных металлов. Ранее было показано, что использование механически стимулированных реакций (МСР) при восстановлении оксида железа алюминием позволяет сформировать оксид алюминия в матрице восстановленного железа [1]. Высокоэкзотермичные реакции восстановления оксидов переходных металлов (например, железа и никеля) могут быть проведены в присутствии избыточного содержания как металла-восстановителя, так и оксидобразующих металлов [2]. Реакции образования карбидов титана и гафния также высокоэкзотермичны, поэтому существует возможность проведения МСР образования карбида гафния в присутствии металла-разбавителя, например, меди.

Целью работы было изучение влияния концентрации избыточного металла на механохимическое восстановление оксидов железа, никеля и меди, а также на механохимический синтез карбида гафния.

Материалы и методы исследования. В исследованиях были использованы порошки оксида железа Fe_2O_3 (ТУ 6-09-5346–87), оксида никеля NiO (ТУ 6-09-4125–80), оксида меди (ТУ 6-09-02-391–85, алюминия ПА-4, углерода (ламповая сажа ПМ-15), гафния (марка ГФМ) и меди (марка ПМС-1).

Механохимическое взаимодействие компонентов изучали в стехиометрических смесях $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 2\text{Al}$, $3\text{NiO} + 2\text{Al}$ и $3\text{CuO} + 2\text{Al}$, рассчитанных на полное восстановление оксидов, и в смесях с двух-, трех- и четырехкратным превышением содержания алюминия над стехиометрическим, а также в присутствии избытка оксидобразующего металла и твердых растворов алюминия в железе и меди. Механохимический синтез карбида гафния проводили в присутствии 20, 30 и 50 мас. % меди. Все эксперименты осуществляли в высокоэнергетической шаровой планетарной мельнице АГО-2 с водяным охлаждением, в атмосфере аргона. Объем барабана 250 см^3 , диаметр шаров 5 мм, загрузка шаров 200 г, навеска обрабатываемого образца 10 г, скорость вращения барабанов вокруг общей оси ~ 1000 об/мин [3].

ИК-спектроскопические исследования проводили на ИК-спектрометре Tensor-27 в диапазоне 4000–400 см⁻¹.

Мёссбауэровские спектры регистрировали на лабораторном спектрометре MS1101Em с использованием радиоактивного источника ⁵⁷Co(Rh). Калибровку спектрометра осуществляли относительно стандарта α-Fe. Модельную расшифровку спектров проводили с помощью программы Univem. В полученных спектральных данных использованы значения сверхтонких параметров спектров из работ по мёссбауэровским исследованиям систем Fe–Al [4] и оксидов железа [5].

Рентгеноструктурные исследования проводили на дифрактометре D8 Advance, Bruker (CuK_α-излучение, Ni-фильтр, позиционно-чувствительный детектор VANTEC1, шаг Δ2θ = 0,021°, время в точке 1100 с). Фазовый состав и кристаллическую структуру образцов определяли по данным рентгеновской дифракции с использованием программного пакета DIFFRAC^{plus}: EVA [6] и базы данных Международного центра дифракционных данных (ICDD) PDF4. Параметры элементарных ячеек сосуществующих фаз рассчитывали методом наименьших квадратов с использованием программы Celref. Количественное содержание фаз определяли из полнопрофильного анализа по методу Ритвельда [7] с использованием программного пакета DIFFRAC^{plus}: TOPAS.

Дифракционные исследования проводили также на станции 4-го канала синхротронного излучения накопителя ВЭПП-3 Сибирского центра синхротронного и терагерцевого излучения. Использован метод, при котором тонкий пучок (0,4 × 0,4 мм) монохроматического излучения (λ = 0,3686 Å) проходит сквозь тонкий слой образца и дает дифракционную картину, регистрируемую плоским двумерным детектором. Для регистрации дифрагированного излучения использована детектирующая система на основе запоминающего экрана MAR345 Marresearch [8].

Морфологические характеристики получены с использованием растрового электронного микроскопа JEOL 6601 LV, изображения – во вторичных электронах при ускоряющем напряжении 20 кВ с увеличением до ×10000.

Результаты и их обсуждение. Система Fe₂O₃ – Al.

Стехиометрический состав Fe₂O₃ + 2Al. Реакция Fe₂O₃ + 2Al = Al₂O₃ + 2Fe является одной из самых экзотермичных среди металлотермических с участием оксида железа (ΔH ≈ 752 кДж/моль) [9].

ИК-спектроскопическое исследование продуктов механохимического синтеза показало, что после 30 с механической активации (МА) реакционной смеси стехиометрического состава в высокочастотной области валентных колебаний ν связи Fe–O наблюдается сдвиг полосы поглощения от 525 до 555 см⁻¹, обусловленный изменениями в структуре α-Fe₂O₃. Увеличение времени МА до 60 с ведет к появлению в спектре четких интенсивных полос поглощения, характерных для α-Al₂O₃, с двумя максимумами при 640 и 610 см⁻¹, относящимися к колебаниям ν Al–O октаэдра [AlO₆], и при 465 см⁻¹ – δ [AlO₆] [10]. Дальнейшая МА не изменяет ИК-спектр продукта.

Рентгеноструктурный анализ показал, что МА смеси оксида железа и алюминия стехиометрического состава в течение 120 с приводит к восстановлению оксида железа алюминием и образованию в продуктах реакции около 21 мас. % шпинели FeAl₂O₄.

Мёссбауэровские спектры после МА в течение 40 с фиксируют восстановленное железо α-Fe и небольшой остаток исходного оксида железа α-Fe₂O₃ (гематит), появляется подспектр с параметрами магнетита Fe₃O₄, дублетные подспектры от незначительного количества интерметаллидов системы Fe–Al (Fe₂Al₅, FeAl₂) и подспектр железо-алюминиевой шпинели, герцинита Fe_xAl_{2-x}O₄ [11] (значительное количество, сопоставимое со свободным α-Fe) (рис. 1, а, табл. 1). Увеличение времени МА до 120 с ведет к практически полному расходованию исходного оксида железа с формированием фазы твердого раствора алюминия в железе α-Fe(Al) и небольшому снижению содержания шпинели (рис. 1, б, табл. 1).

Составы Fe₂O₃ + 4Al и Fe₂O₃ + 6Al. По данным мёссбауэровской спектроскопии, при увеличении в исходной смеси содержания металла-восстановителя (алюминия) в 2 раза по сравнению со стехиометрическим, α-Fe₂O₃ почти весь расходуется уже за 40 с МА, как и в стехиометрической смеси (табл. 1).

Большая часть восстановленного железа взаимодействует с избыточным алюминием с формированием основной интерметаллической фазы FeAl и небольших количеств Fe₂Al₅ и FeAl₂. Часть α-Fe остается в виде свободного металла. Увеличение времени МА до 120 с приводит к накоплению фазы FeAl и появлению, кроме Fe₂Al₅ и FeAl₂, фазы твердого раствора алюминия в железе α-Fe(Al) (табл. 1).

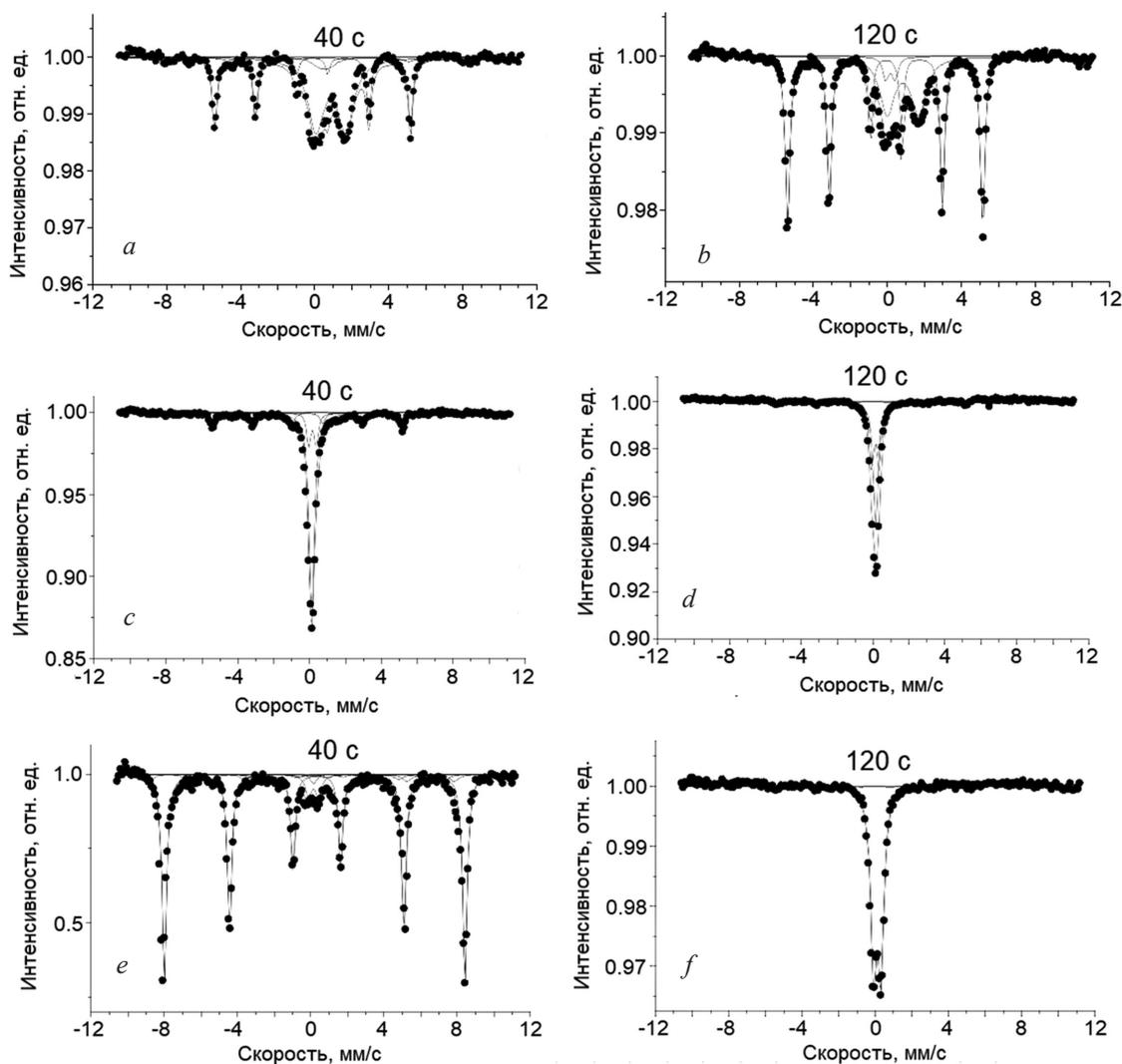


Рис. 1. Мёссбауэровские спектры смесей $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 2\text{Al}$ (*a, b*), $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 4\text{Al}$ (*c, d*) и $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 6\text{Al}$ (*e, f*) после МА в течение 40 с (*a, c, e*) и 120 с (*b, d, f*)

Fig. 1. Mössbauer spectra of $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 2\text{Al}$ (*a, b*), $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 4\text{Al}$ (*c, d*), and $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 6\text{Al}$ (*e, f*) mixtures after MA for 40 s (*a, c, e*) and 120 s (*b, d, f*)

При трехкратном избытке алюминия в исходной смеси заметно уменьшается скорость механохимического восстановления. По данным мёссбауэровской спектроскопии (табл. 1), в процессе МА такой смеси в течение 40 с на восстановление расходуется менее 30 % $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, появляются Fe_3O_4 и небольшие количества интерметаллидов Fe_2Al_5 , FeAl_2 и FeAl . После 120 с МА продукт представляет собой смесь интерметаллидов Fe_2Al_5 и FeAl_2 и незначительного количества $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$.

При четырехкратном избытке алюминия в исходной смеси восстановление оксида железа в аналогичных режимах МА практически не происходит.

По данным рентгеноструктурного анализа существенного взаимодействия между компонентами в процессе обработки не наблюдается. Все основные пики на дифрактограмме относятся к исходным фазам: Fe_2O_3 и Al . Тем не менее, многие пики имеют несимметричную форму с небольшими выступами, свидетельствующими о некотором взаимодействии.

Мёссбауэровский спектр образца $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 8\text{Al}$ после МА в течение 2 мин представляет собой совокупность компонент, каждая из которых обусловлена образовавшимися соединениями железа с алюминием и кислородом и имеет известные мёссбауэровские параметры. В спектре выделяются следующие компоненты: интенсивный секстет с параметрами, характерными для гематита $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ($H_{\text{эфф}} = 515$ кЭ, $\delta = 0,374$ мм/с, $\Delta Q = -0,117$ мм/с), также два секстета, соответствующие

Т а б л и ц а 1. Результаты фазового анализа методом мёссбауэровской спектроскопии МА смесей Fe₂O₃ + 2Al, Fe₂O₃ + 4Al и Fe₂O₃ + 6Al

Table 1. Results of phase analysis by Mössbauer spectroscopy of MA products of Fe₂O₃ + 2Al, Fe₂O₃ + 4Al, and Fe₂O₃ + 6Al mixtures

Образец Sample	Время МА, с Mechanical activation time, s	*H _{эфф} , (±2), кЭ	δ, (±0,02), мм/с	Δ, (±0,02), мм/с	Γ, (±0,02), мм/с	S, (±1), %	Фазовый состав Phase composition		
Fe ₂ O ₃ + 2Al	40	512	0,36	-0,18	0,32	5	α-Fe ₂ O ₃		
		494	0,33	0,62	0,32	3	Fe ₃ O ₄		
		460	0,64	0,01	0,32	4	Fe ₃ O ₄		
		330	-0,05	0,01	0,27	37	α-Fe		
			0,85	1,79	0,77	45	Fe _{2-x} Al _x O ₄		
			0,16	0,96	0,45	4	Fe ₂ Al ₅		
			0,23		0,48	2	FeAl		
	120	325	-0,08	0,01	0,28	65	α-Fe(Al)		
			0,87	1,78	0,77	29	Fe _{2-x} Al _x O ₄		
			0,25	0,45	0,35	4	Fe ₂ Al ₅		
			0,20		0,40	2	FeAl		
	Fe ₂ O ₃ + 4Al	40	512	0,36	-0,2	0,27	4	α-Fe ₂ O ₃	
			490	0,25	-0,35	0,27	3	Fe ₃ O ₄	
			460	0,46	0,02	0,29	3	Fe ₃ O ₄	
329			0,0	-0,01	0,27	14	α-Fe		
			0,16	0,41	0,30	19	FeAl ₂		
			0,27	0,44	0,29	4	Fe ₂ Al ₅		
			0,20		0,36	53	FeAl		
120		325	0,03	0,01	0,42	8	α-Fe(Al)		
			0,15	0,40	0,30	19	FeAl ₂		
			0,24	0,49	0,27	4	Fe ₂ Al ₅		
			0,18		0,39	62	FeAl		
		Fe ₂ O ₃ + 6Al	40	512	0,29	-0,18	0,30	72	α-Fe ₂ O ₃
				490	0,28	-0,26	0,77	8	Fe ₃ O ₄
				460	0,46	0,00	0,75	11	Fe ₃ O ₄
	0,19			0,47	0,50	2	FeAl ₂		
	0,15			0,41	0,40	2	Fe ₂ Al ₅		
	0,23				0,50	5	FeAl		
120	515		0,24	-0,02	0,45	4	α-Fe ₂ O ₃		
		0,18	0,43	0,36	41	Fe ₂ Al ₅			
		0,23	0,44	0,38	55	FeAl ₂			

Примечания: H_{эфф} – эффективное магнитное поле на ядре ⁵⁷Fe, δ – изомерный сдвиг, Δ – квадрупольное расщепление, Γ – экспериментальная ширина линии, S – площадь подспектра.

Notes: H_{эфф} – effective magnetic field on the ⁵⁷Fe core, δ – isomeric shift, Δ – quadrupole splitting, Γ – experimental line width, S – subspectrum area.

ющие различным положениям Fe в шпинельной решетке замещенного магнетита Fe_{3-x}Al_xO₄ (H¹_{эфф} = 500 ± 20 кЭ, H²_{эфф} = 450 ± 20 кЭ, δ¹ = 0,35 мм/с, δ² = 0,6 мм/с), секстет с параметрами α-Fe (H_{эфф} = 330 кЭ) слабой интенсивности. В центральной части спектра содержится дублет с параметрами интерметаллидной фазы FeAl₂ (Fe₂Al₅). По результатам мёссбауэровского анализа можно определить процентное соотношение железосодержащих фаз в образце. Количественный анализ с точностью до 1 % показывает, что для данной взаимной концентрации гематита и алюминия в исходной смеси происходит лишь частичное восстановление гематита с образованием промежуточных окислов и интерметаллических фаз: в образце еще присутствует 73 мас. % Fe₂O₃, а также 8 мас. % Fe₃O₄, 3 мас. % α-Fe, 12 мас. % интерметаллида FeAl₂ (Fe₂Al₅) и 4 мас. % FeAl.

Структура образовавшихся механокомпозигов не совсем однородная: кроме типичных областей композиционных частиц имеются области, в которых присутствуют достаточно крупные металлические частицы, практически без или с небольшим количеством оксидных включений, иногда расположенных по периферии металлических частиц. Средний размер областей когерентного рассеяния для алюминия составляет ~ 100 нм, для оксида железа – ~ 50 нм.

Составы $Fe_2O_3 + 8Al + xFe$. ИК-спектроскопические исследования, которые являются чувствительным методом для обнаружения оксидов, показали, что при добавлении 1 г Fe к 15 г смеси (менее 7 мас. %) через 2 мин МА практически исчезают полосы поглощения связи Fe–O, а после 3 мин МА наблюдаются характеристические полосы $\alpha-Al_2O_3$: $\nu Al-O$ (610 и 650 cm^{-1}) и δAlO_4^- (480 cm^{-1}).

Рентгеновская дифракция этой смеси после 2 мин МА свидетельствует о начале реакции и появлении смесей сложных оксидов железа и интерметаллических соединений. Размеры областей когерентного рассеяния (о. к. р.) Fe_2O_3 после 2 мин МА ~ 55 нм, что несколько больше, чем для смеси без добавления железа. При полном прохождении реакции в смеси 6,4 г $Fe_2O_3 + 8,6$ г Al + 2 г Fe размеры средних значений о. к. р. составляют: интерметаллида $FeAl_2$ – 40 нм, оксида алюминия Al_2O_3 – 83 нм.

В то же время величина микронапряжений в частицах Fe_2O_3 в смесях в присутствии железа существенно возрастает.

Мёссбауэровское исследование образца с исходным количеством чистого железа 1 г показало, что вплоть до трех минут размола происходит лишь слабое восстановление оксида железа с образованием небольшого количества шпинельной структуры $Fe_{2-x}Al_xO_4$. Количественный анализ показывает, что в образце за 2 мин МА произошло взаимодействие компонентов с образованием небольшого количества (всего 4 мас. %) интерметаллической фазы, которой в спектре соответствует центральный дублет с параметрами, близкими к параметрам фаз Fe_2Al_5 ($FeAl_2$). Также в спектре присутствуют секстеты исходного Fe_2O_3 и промежуточного оксида $Fe_{2-x}Al_xO_4$ (15 мас. %). После 3 мин МА наблюдается резкое прохождение реакции восстановления: на мёссбауэровском спектре исчезают компоненты оксида железа, при этом в процессе реакции образуется значительное количество интерметаллида $FeAl_2(Fe_2Al_5)$ – 94 мас. %.

Для образца с 2 г Fe время начала восстановления – 2 мин МА. В образце после 2 мин МА присутствует интерметаллидная фаза $FeAl_2$ (Fe_2Al_5) – 88 мас. % и гематит – 2 мас. %, а также 5 мас. % $Fe_{2-x}Al_xO_4$ и α -железо – 6 мас. %. На ИК-спектре образца исчезают полосы поглощения Fe_2O_3 и появляются полосы Al_2O_3 .

Как следует из мёссбауэровских спектров в смесях с 3 и 4 г железа, полного восстановления оксида вплоть до 3 мин МА не наблюдается. Такая картина свидетельствует о том, что увеличение количества железа в исходной смеси при наличии избытка алюминия препятствует формированию оксида алюминия. Анализ мёссбауэровского спектра образца с 4 г Fe после 3 мин МА показывает наличие в спектре компоненты с величиной эффективного магнитного поля $H_{эфф} = 258$ кЭ в количестве 38 %. Эта компонента имеет увеличенное значение ширины мёссбауэровской линии $\Gamma = 0,78$ мм/с по сравнению с экспериментальной шириной $\Gamma = 0,27$ мм/с. Также в спектре присутствуют компоненты оксидов Fe_2O_3 – 37 мас. % и Fe_3O_4 – 18 мас. %, небольшое количество α -Fe и интерметаллидной фазы $Fe_2Al_5(FeAl_2)$ – 3 мас. %.

В образцах с 5 г железа в исходной смеси происходит образование аналогичной ($H_{эфф} = 252$ кЭ, $\Gamma = 0,78$ мм/с) разупорядоченной структуры уже после 40 с МА, а восстановления оксида железа не происходит, что подтверждается отсутствием структурных максимумов α -Fe на рентгенограммах.

Анализ кинетических зависимостей количества Fe_2O_3 в образце от времени механоактивации для образцов с различным содержанием железа (от 1 до 5 г) показал, что при увеличении количества железа в смеси наблюдается торможение восстановления оксида Fe_2O_3 , это выражается в том, что для образцов с содержанием железа в исходной смеси 3, 4 и 5 г, количество Fe_2O_3 остается практически постоянным.

Таким образом, проведенные исследования показали, что при механохимическом взаимодействии компонентов смеси при определенных их взаимных концентрациях возможно полное про-

хождение реакции восстановления оксида железа с образованием нанокompозита Fe_2Al_5/Al_2O_3 . Установлено также, что существуют концентрационная и временная зависимости скорости механохимического восстановления оксида железа: повышение концентрации железа в смеси Fe_2O_3 (6,4 г) + Al (8,6 г) + xFe уменьшает скорость измельчения частиц оксида железа и препятствует образованию оксида алюминия, приводя к образованию разупорядоченной структуры на основе железа.

Механохимическое восстановление оксида железа алюминием проходит через стадию формирования сложного оксида герцинита $Fe_xAl_{2-x}O_4$. В условиях эксперимента механохимическую реакцию восстановления можно провести только до трехкратного избытка алюминия. Далее реакция останавливается, однако добавление небольшого количества (от 7 до 15 мас. %) порошка железа в исходную реакционную смесь снова делает возможным восстановление оксида. Если торможение реакции восстановления при большом избытке алюминия можно объяснить капсулированием частиц оксида продуктами взаимодействия, когда вследствие наличия большого количества очень пластичного алюминия становится невозможным дальнейшее диспергирование оксида и создание новой контактной поверхности Fe_2O_3/Al для прохождения механохимической реакции, то влияние добавок железа при большом содержании алюминия пока не объяснено.

Состав $Fe_2O_3 + Fe(Al)$. Количество алюминия в смеси 3,75 г α - Fe_2O_3 и 6,25 г Fe (20 мас. % Al) соответствовало стехиометрическому составу. Мёссбауэровский спектр такой многокомпонентной исходной смеси представляет собой суперпозицию подспектров оксида α - Fe_2O_3 (42 мас. %), интерметаллидов (31 мас. %) и аморфной фазы (27 мас. %).

Для того чтобы увеличить содержание металлической составляющей композита для восстановления оксида железа, вместо металлического алюминия была использована механоактивированная в течение 20 мин смесь Fe + 20 мас. % Al. По данным мёссбауэровской спектроскопии эта смесь состоит из интерметаллидов Fe_2Al_5 , FeAl (52 мас. %) – дублеты и синглет и разупорядоченной или аморфной фазы на основе железа (48 мас. %) – секстет с наличием распределения сверхтонких полей в диапазоне 200–300 кЭ и величиной $H_{эфф} = 50$ кЭ.

Согласно мёссбауэровским исследованиям через 2 мин МА в смеси присутствуют: 18,5 мас. % исходного α - Fe_2O_3 , 11 мас. % Fe_3O_4 , 11 мас. % FeO, 8 мас. % Fe, 21 мас. % смеси интерметаллидов, 21 мас. % разупорядоченной фазы. Через 4 мин МА смесь состоит из 11 мас. % Fe_2O_3 , 10 мас. % Fe_3O_4 , 14 мас. % FeO, 13 мас. % Fe, 21 мас. % смеси интерметаллидов и 23 мас. % аморфной фазы. МА в течение 12 мин приводит к полному исчезновению оксидов железа. Основным компонентом смеси (60 мас. %) является твердый раствор алюминия в железе α -Fe(Al). Ему соответствуют подспектры с $H_{эфф} = 330, 309, 289$ кЭ, возникающие вследствие наличия различного окружения атомов железа в твердом растворе. Присутствуют также интерметаллиды (в количестве 12 мас. %) и разупорядоченная фаза (24 мас. %). Обнаружены следы (до 3 мас. %) сложного оксида $FeAl_2O_4$.

Рентгеновские исследования с применением синхротронного излучения показали, что после 2 мин МА смеси, состоящей из 3,75 г α - Fe_2O_3 и 6,25 г Fe(Al) (состав Fe + 20 мас. % Al), снижается интенсивность дифракционных отражений и оксида, и интерметаллидной составляющей, после 4 мин МА все пики на дифрактограмме становятся уширенными. Дифрактограмма смеси после 12 мин МА представляет собой картину, характерную для железа. Оксидные фазы алюминия не фиксируются. Можно предположить, что в этих условиях формируется рентгеноаморфная модификация Al_2O_3 , однако при нагревании продукта механоактивации до 700 °C кристаллизация оксида алюминия не происходит. Не исключено, что оксид алюминия располагается очень тонким слоем на поверхности наноразмерных частиц железа. Косвенным подтверждением этого является отсутствие рекристаллизации железа при нагревании.

Использование механохимического восстановления оксидов железа алюминием и его твердыми растворами дает возможность получать широкий класс композиционных материалов с различными морфологическими особенностями.

Система NiO–Al. Схожая задача стояла для системы NiO–Al: механохимически сформировать моноалюминид никеля, модифицированный оксидом алюминия. Известно, что химическая реакция восстановления оксида никеля алюминием является высокоэкзотермической [9]. Про-

ведено исследование процесса механохимического взаимодействия в системе NiO + Al при стехиометрическом соотношении оксида никеля и алюминия, а также при двух- и трехкратном избытке алюминия.

Стехиометрический состав 3NiO + 2Al. ИК-спектроскопическое исследование продуктов механохимического восстановления оксида никеля алюминием по реакции $3\text{NiO} + 2\text{Al} = \text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{Ni}$ при стехиометрическом составе исходной смеси показало, что уже после 20 с МА в ИК-спектре наблюдаются изменения: вместо двух максимумов полосы валентных колебаний связи Ni–O в оксиде никеля 475 и 425 см^{-1} остается только один – при 475 см^{-1} .

Рентгенографические исследования не фиксируют на этом этапе МА никаких изменений фазового состава смеси, в активированной смеси присутствуют только NiO и Al. После 40 с МА вместо полосы валентных колебаний Ni–O появляется широкая интенсивная полоса с несколькими максимумами, которые могут быть отнесены как к $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, так и к смеси с другими оксидными формами. Согласно данным РФА, за это время МА оксид никеля частично восстанавливается до металлического никеля кубической модификации, образуется сложный оксид $\text{NiAl}_{26}\text{O}_{40}$, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, часть оксида никеля остается непрореагировавшей.

После МА в течение 60 с основными компонентами реакционной смеси являются $\beta\text{-Ni}$, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, сложный оксид $\text{NiAl}_{26}\text{O}_{40}$ и часть непрореагировавшего NiO. При дальнейшей активации до 240 с исчезает фаза сложного оксида, в активированной смеси присутствуют $\beta\text{-Ni}$, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ и остаток непрореагировавшего NiO. Возможно, наличие остатка оксида никеля в конечном продукте связано с недостатком алюминия, который, вследствие его высокой пластичности, имеет свойство налипать на поверхности барабанов и шаров. Параметр решетки никеля при всех временах МА существенно не меняется и составляет 0,3529–0,3533 нм, области когерентного рассеяния уменьшаются с 25 до 15 нм.

Составы 3NiO + 4Al и 3Ni + 6Al. При двукратном увеличении содержания алюминия в реакционной смеси ($3\text{NiO} + 4\text{Al}$), согласно данным ИК-спектроскопии, оксид никеля восстанавливается через 40 с, при этом формируется $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. Последующая МА в течение 60–120 с не приводит к существенным изменениям в ИК-спектрах.

Дифракционные исследования свидетельствуют о восстановлении оксида никеля, а также об образовании интерметаллического соединения NiAl. Области когерентного рассеяния фазы NiAl составляют ~ 7 нм и с увеличением длительности МА не изменяются.

Согласно дифракционным исследованиям, в реакционной смеси $3\text{NiO} + 6\text{Al}$ уже через 20 с МА появляются следы $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, однако отражения NiO и Al на дифрактограммах сохраняются. После 40 с МА формируются фазы $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ и Ni_2Al_3 , которые сохраняются и при дальнейшей МА, размер областей когерентного рассеяния интерметаллида Ni_2Al_3 уменьшается с 17 до 13 и 12 нм при длительности МА 60, 120 и 180 с соответственно.

При механической активации смеси оксида никеля и алюминия стехиометрического состава образуется композит Ni/Al₂O₃, при двукратном избытке алюминия формируется механокомпозит NiAl/Al₂O₃, с трехкратным избытком – механокомпозит Ni₂Al₃/Al₂O₃.

Система CuO–Al. ИК-спектроскопические исследования этого процесса в условиях МА показали, что после МА смеси стехиометрического состава в течение 40 с в ИК-спектре появляются валентные и деформационные полосы поглощения $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. Если в ИКС исходного образца имеется полоса с двумя максимумами 575 и 520 см^{-1} , принадлежащими валентным колебаниям ν связи Cu(II)–O, то после МА в течение 40 с появляются полосы с максимумами 650, 615 см^{-1} , плечо 790 и 455 см^{-1} , характерные для алюминия в октаэдрическом окружении, принадлежащие валентным колебаниям связи Al–O.

Дифракционные исследования также свидетельствуют об образовании $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ и о восстановлении меди при МА в течение 40 с.

Поскольку реакция восстановления оксида меди высокоэкзотермична, снижение температуры синтеза возможно при введении в реакционную смесь в качестве разбавителя тех же соединений, которые образуются в процессе реакции, например, меди.

Для увеличения содержания меди при сохранении стехиометрического соотношения оксида меди и алюминия в качестве восстановителя был использован механохимически полученный твердый раствор алюминия в меди, содержащий 20 % алюминия: $\text{CuO} + \text{Cu}(\text{Al}) \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cu}$.

ИК-спектроскопическое исследование взаимодействия оксида меди с твердым раствором Cu(Al) показало, что процесс начинается к концу второй минуты МА. Интенсивность полосы валентных колебаний ν Cu–O к этому времени уменьшается, полоса становится размытой, что может свидетельствовать о нарушениях в структуре оксида меди. Последующая активация в течение 10 с ведет к значительным изменениям в ИК-спектрах, появляются четкие полосы валентных и деформационных колебаний октаэдров $[AlO_6]$, что характерно для фазы $\alpha-Al_2O_3$.

Проведенный рентгенофазовый анализ с использованием СИ показал, что уже после 10 с МА в смеси кроме исходных компонентов образуется оксид Cu_2O . При последующей механической активации в течение 90 с кроме уменьшения размеров о. к. р. сосуществующих фаз (о чем свидетельствует снижение интенсивностей и уширение рефлексов на дифрактограмме) никаких существенных изменений в системе не происходит.

Можно предположить, что на этом этапе между компонентами формируется развитая контактная поверхность, в результате чего следующие 10 с механической обработки приводят к резкому изменению фазового состава: восстановлению меди и образованию Al_2O_3 . Таким способом могут быть сформированы наноккомпозиты Cu/ Al_2O_3 с различным содержанием меди.

Таким образом, проведенные исследования показали, что при механической активации оксида меди с твердым раствором алюминия в меди (количество алюминия в твердом растворе соответствует стехиометрическому составу $3CuO + 2Al$) формируется композит Cu/ Al_2O_3 . Этот композиционный материал полностью замешивается в расплав меди. Электронная микроскопия подтверждает, что кристаллиты оксидной фазы распределяются по границам зерен литой меди.

Системы Hf–C и Hf–C–Cu. Система Hf–C. В системе Hf–C зарегистрировано единственное соединение HfC с ГЦК структурой типа NaCl и широкой областью гомогенности (~15 ат. %) [12]. Поскольку температура плавления Hf (~2230 °C) ниже адиабатической температуры взаимодействия Hf с углеродом (~3630 °C), а энтальпия образования карбида гафния высока (–227,09 кДж), можно предположить, что механохимическое взаимодействие в системе Hf–C происходит с участием жидкого гафния. Появление жидкого металла резко снижает прочностные характеристики твердой фазы [13], при этом на несколько порядков увеличивается площадь контактной поверхности между ними по сравнению с твердофазным взаимодействием за счет диспергирования твердофазной компоненты и растекания жидкого металла по вновь вскрываемой поверхности [14]. Химическое взаимодействие в системах с отрицательной энтальпией смешения начинается одновременно с появлением металлического расплава, который впитывается в слой высокодисперсного углерода. На интенсивность диспергирования твердофазной компоненты в металлическом расплаве существенное влияние оказывает механическое воздействие, поскольку известно, что контактная поверхность увеличивается не только за счет измельчения твердой фазы, но и благодаря трению, при котором происходит удаление продукта реакции с контактной поверхности, в результате чего жидкий металл вновь контактирует с твердой поверхностью с образованием продукта реакции.

По данным РФА, механическая активация смеси Hf + C в течение 8 мин приводит к формированию монофазного ультрадисперсного карбида гафния [15].

По данным электронной микроскопии, механосинтезированный карбид гафния представляет собой агломераты с размерами 0,2–0,6 мкм, состоящие из первичных частиц 10–12 нм [15]. Агломерация может оказаться препятствием для равномерного распределения в медном расплаве. Улучшение смачиваемости модификатора медным расплавом может быть обеспечено включением меди в состав модификатора. Высокая энтальпия образования карбида гафния может позволить провести разбавление смеси углерода с гафнием некарбидообразующим металлом, например, медью. Характер распределения модификатора в матрице металла можно оценить анализируя электронно-микроскопические изображения, полученные в обратно-рассеянных электронах.

Система Hf–C–Cu. В смесях (Hf + C) + Cu с различным содержанием меди (50, 30 и 20 мас. %) после механической обработки в течение 20 мин присутствуют кубический карбид гафния и металлическая медь (рис. 2, а). Интенсивность рефлексов HfC закономерно уменьшается с увеличением содержания Cu в смеси, а их ширина увеличивается, что свидетельствует об уменьшении размеров кристаллитов образующегося карбида гафния.

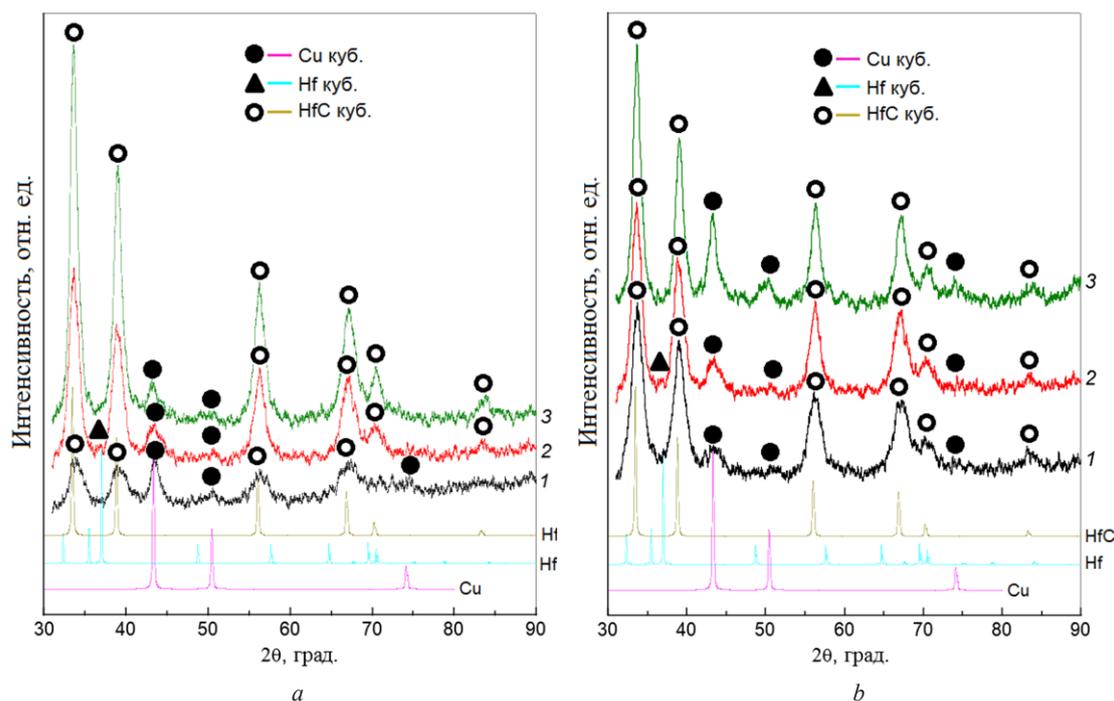


Рис. 2. Дифрактограммы: *a* – смесей $(100 - x)(\text{Hf} + \text{C}) + x\text{Cu}$, активированных в течение 20 мин: $x = 50$ (1), 30 (2) и 20 мас. % (3); *b* – смеси $(\text{Hf} + \text{C})$ (70 мас. %) + Cu (30 мас. %), активированной в течение 12 (1) и 20 (2) и смеси HfC (70 мас. %) + Cu (30 мас. %), активированной в течение 20 мин (3)

Fig. 2. XRD: *a* – mixtures $(100 - x)(\text{Hf} + \text{C}) + x\text{Cu}$, activated for 20 min: $x = 50$ (1), 30 (2) and 20 wt. % (3); *b* – mixtures $(\text{Hf} + \text{C})$ (70 wt. %) + Cu (30 wt. %), activated for 12 (1) and 20 (2) and mixtures of HfC (70 wt. %) + Cu (30 wt. %) activated within 20 min (3)

В смеси $(\text{Hf} + \text{C})$ (70 мас. %) + Cu (30 мас. %), активированной в течение 12 и 20 мин, карбид гафния имеет близкие размеры кристаллитов (ширина и интенсивность рефлексов HfC практически одинаковы) (рис. 2, *b*, кривые 1 и 2); это же относится и к меди. В активированной 20 мин смеси HfC (70 мас. %) + Cu (30 мас. %), где HfC это смесь Hf + C после механической обработки в течение 12 мин в Ag, карбид гафния характеризуется относительно большими размерами областей когерентного рассеяния, о чем свидетельствуют интенсивные и узкие рефлексы (рис. 2, *b*, кривая 3).

По данным РЭМ, порошки композитов HfC/Cu всех составов сильно агломерированы, величина агломератов составляет от 1–5 до 15–20 мкм.

Заключение. Проведенные исследования показали, что в высокоэкзотермических системах оксид (карбид)–металл в ходе механически стимулированных реакций возможно образование высокодисперсных керамических частиц, плакированных металлом, которые могут быть использованы в качестве лигатуры для модифицирования пластичных металлов с целью их упрочнения.

Механохимическое восстановление оксидов железа, никеля и меди стехиометрическим количеством алюминия позволяет получить композиты $\text{Fe}(\text{Ni}, \text{Cu})/\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. В случае двукратного превышения алюминия над стехиометрическим получены моноалюминиды железа, никеля и меди, модифицированные $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. При трехкратном избытке алюминия формируются алюминиды с большим содержанием алюминия. При четырехкратном увеличении содержания алюминия механохимическое восстановление оксидов не происходит. Предпочтительным способом модифицирования металлов оксидом алюминия является механохимическое восстановление оксидов твердым раствором алюминия в металле, образующем оксид.

В ходе механохимического синтеза карбида гафния в присутствии меди в количестве 20, 30 и 50 мас. % получены композиты HfC/Cu. При увеличении содержания меди уменьшаются размеры кристаллитов образующегося карбида гафния.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-53-00037) и БРФФИ (проект № T20P-037).

Acknowledgements. The study was supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant 20-53-00037) and Belarusian Foundation for Fundamental Research (grant T20P-037).

Список использованных источников

1. Schaffer, G. B. Combustion synthesis by mechanical alloying / G. B. Schaffer, P. G. McCormic // *Scripta Met.* – 1989. – Vol. 23, N 6. – P. 835–838. [https://doi.org/10.1016/0036-9748\(89\)90255-x](https://doi.org/10.1016/0036-9748(89)90255-x)
2. Structure Peculiarities of Nanocomposite Powder Fe₄₀Al/Al₂O₃ Produced by MASHS / T. Talaka [et al.] // *Mater. Sci. Forum.* – 2007. – Vol. 534–536. – P. 1421–1424. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.534-536.1421>
3. Аввакумов, Е. Г. Твердофазное восстановление касситерита / Е. Г. Аввакумов, В. Е. Дьякова, Л. И. Стругова // *Изв. СО АН СССР, сер. хим. наук.* – 1974. – Т. 2. – С. 26–29.
4. Structural Study of Fe–Al Nanomaterial Produced by Mechanical Activation and Self-Propagating High-Temperature Synthesis / T. Yu. Kiseleva [et al.] // *Moscow University Physics Bulletin.* – 2008. – Vol. 63, N 1. – P. 55–60.
5. Cornell, R. M. *The Iron Oxides: Structure, Properties, Reactions, Occurrences and Uses* / R. M. Cornell, U. Schwertmann. John Wiley & Sons, 2006. – 703 p.
6. *DIFFRAC^{plus}: EVA*. Bruker AXS GmbH, Ostliche. Rheinbruckenstraße 50, D-76187. – Karlsruhe, Germany, 2008.
7. Rietveld H. M. A Profile Refinement Method for Nuclear and Magnetic Structures / H. M. Rietveld // *J. Appl. Crystallogr.* – 1969. – Vol. 2, N 2. – P. 65–71. <https://doi.org/10.1107/s0021889869006558>
8. New station at the 4th beamline of the VEPP-3 storage ring / A. I. Ancharov [et al.] // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research.* – 2001. – Vol. A 470, N 1–2. – P. 80–83. [https://doi.org/10.1016/s0168-9002\(01\)01029-4](https://doi.org/10.1016/s0168-9002(01)01029-4)
9. Подёргин, В. А. Металлотермические системы / В. А. Подёргин. – М., 1992. – 272 с.
10. Tarte, P. Infra-red spectra of inorganic aluminates and characteristic vibrational frequencies of AlO₄ tetrahedra and AlO₆ octahedra / P. Tarte // *Spectrochimica Acta, Part A.* – 1967. – Vol. 23, N 7. – P. 2127–2143. [https://doi.org/10.1016/0584-8539\(67\)80100-4](https://doi.org/10.1016/0584-8539(67)80100-4)
11. ⁵⁷Fe Mössbauer and electronic spectroscopy study on a new synthetic hercynite-based pigment / G. B. Andreozzi [et al.] // *J. European Ceramic Society.* – 2004. – Vol. 24, N 5. – P. 821–824. [https://doi.org/10.1016/s0955-2219\(03\)00329-7](https://doi.org/10.1016/s0955-2219(03)00329-7)
12. Диаграммы состояния двойных металлических систем: справочник: в 3 т. / под общ. ред. Н. П. Лякишева. – М., 1997. – Т. 1. – 1024 с.
13. Лихтман, В. И. Физико-химическая механика металлов / В. И. Лихтман, Е. Д. Щукин, П. А. Ребиндер. – М., 1962. – 303 с.
14. Сумм, Б. Д. Физико-химические основы смачивания и растекания / Б. Д. Сумм, Ю. В. Горюнов. – М., 1976. – 231 с.
15. Rapid mechanochemical synthesis of titanium and hafnium carbides / N. Lyakhov [et al.] // *J. Mater. Sci.* – 2018. – Vol. 53, N 19. – P. 13584–13591. <https://doi.org/10.1007/s10853-018-2450-x>

References

1. Schaffer G. B., McCormic P. G. Combustion synthesis by mechanical alloying. *Scripta Metallurgica*, 1989, vol. 23, no. 6, pp. 835–838. [https://doi.org/10.1016/0036-9748\(89\)90255-x](https://doi.org/10.1016/0036-9748(89)90255-x)
2. Talaka T., Grigorieva T., Vitiaz P., Lyakhov N., Letsko A., Barinova A. Structure Peculiarities of Nanocomposite Powder Fe₄₀Al/Al₂O₃ Produced by MASHS. *Materials Science Forum*, 2007, vol. 534–536, pp. 1421–1424. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.534-536.1421>
3. Avvakumov E. G., Dyakova V. E., Strugova L. I. Solid phase reduction of cassiterite. *Izvestija Sibirskogo otdelenija AN SSSR, serija himicheskikh nauk* [Proceedings of the Siberian Branch of the Academy of Sciences of the USSR, a series of chemical sciences], 1974, vol. 2, pp. 26–29 (in Russian).
4. Kiseleva T. Yu., Grigor'eva T. F., Gostev D. V., Potapkin V. B., Falkova A. N., Novakova A. A. Structural Study of Fe–Al Nanomaterial Produced by Mechanical Activation and Self-Propagating High-Temperature Synthesis. *Moscow University Physics Bulletin*, 2008, vol. 63, no. 1, pp. 55–60.
5. Cornell R. M., Schwertmann U. *The Iron Oxides: Structure, Properties, Reactions, Occurrences and Uses*. John Wiley & Sons, 2006. 703 p.
6. *DIFFRAC^{plus}: EVA*. Bruker AXS GmbH, Ostliche. Rheinbruckenstraße 50, D-76187. Karlsruhe, Germany, 2008.
7. Rietveld H. M. A Profile Refinement Method for Nuclear and Magnetic Structures. *Journal of Applied Crystallography*, 1969, vol. 2, no. 2, pp. 65–71. <https://doi.org/10.1107/s0021889869006558>
8. Ancharov A. I., Manakov A. Yu., Mezentsev N. A., Tolochko B. P., Sheromov M. A., Tsukanov V. M. New station at the 4th beamline of the VEPP-3 storage ring. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2001, vol. A 470, no. 1–2, pp. 80–83. [https://doi.org/10.1016/s0168-9002\(01\)01029-4](https://doi.org/10.1016/s0168-9002(01)01029-4)
9. Podergin V. A. *Metal-thermal systems*. Moscow, 1992. 272 p. (in Russian).
10. Tarte P. Infra-red spectra of inorganic aluminates and characteristic vibrational frequencies of AlO₄ tetrahedra and AlO₆ octahedra. *Spectrochimica Acta, Part A*, 1967, vol. 23, no. 7, pp. 2127–2143. [https://doi.org/10.1016/0584-8539\(67\)80100-4](https://doi.org/10.1016/0584-8539(67)80100-4)
11. Andreozzi G. B., Baldi G., Berardini G. P., Di Benedetto F., Romanelli M. ⁵⁷Fe Mössbauer and electronic spectroscopy study on a new synthetic hercynite-based pigment. *Journal of the European Ceramic Society*, 2004, vol. 24, no. 5, pp. 821–824. [https://doi.org/10.1016/s0955-2219\(03\)00329-7](https://doi.org/10.1016/s0955-2219(03)00329-7)

12. Lyakishev N. P., ed. *Diagrams of the state of binary metal systems: a reference book: in 3 volumes*. Moscow, 1997, vol. 1. 1024 p. (in Russian).
13. Likhtman V. I., Shchukin E. D., Rebinder P. A. *Physical and chemical mechanics of metals*. Moscow, 1962. 303 p. (in Russian).
14. Summ B. D., Goryunov Yu. V. *Physical and chemical bases of wetting and spreading*. Moscow, 1976. 231 p. (in Russian).
15. Lyakhov N., Grigoreva T., Šepelák V., Tolochko B., Ancharov A., Vosmerikov S., Devyatkina E., Udalova T., Petrova S. Rapid mechanochemical synthesis of titanium and hafnium carbides. *Journal of Materials Science*, 2018, vol. 53, no. 19, pp. 13584–13591. <https://doi.org/10.1007/s10853-018-2450-x>

Информация об авторах

Жорник Виктор Иванович – д-р техн. наук, профессор, заведующий лабораторией. Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси (ул. Академическая, 12, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: zhornikv@gmail.com.

Григорьева Татьяна Федоровна – д-р хим. наук, вед. науч. сотрудник. Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН (ул. Кутателадзе, 18, 630128, Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: grig@solid.nsc.ru.

Ковалева Светлана Анатольевна – канд. техн. наук, вед. науч. сотрудник. Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси (ул. Академическая, 12, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: svetakov2021@gmail.com.

Киселева Татьяна Юрьевна – д-р физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник, доцент. МГУ им. М. В. Ломоносова (ул. Ленинские Горы, 1, 119991, Москва, Российская Федерация). E-mail: kiseleva.tyu@gmail.com.

Девяткина Евгения Тимофеевна – науч. сотрудник. Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН (ул. Кутателадзе, 18, 630128, Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: devyatkina@solid.nsc.ru.

Восмериков Сергей Владимирович – науч. сотрудник. Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН (ул. Кутателадзе, 18, 630128, Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: vosmerikov@solid.nsc.ru.

Веремей Илья Сергеевич – техник. Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси (ул. Академическая, 12, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: stetarum@gmail.com.

Ляхов Николай Захарович – академик, д-р хим. наук, гл. науч. сотрудник. Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН (ул. Кутателадзе, 18, 630128, Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: lyakhov@solid.nsc.ru.

Information about the authors

Zhornik Viktor I. – D. Sc. (Engineering), Professor, Head of the Laboratory. Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (12, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: zhornikv@gmail.com.

Grigoreva Tatiana F. – D. Sc. (Chemistry), Leading Researcher. Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry of the SB of the RAS (18, Kutateladze Str., 630128, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: grig@solid.nsc.ru.

Kovaliova Svetlana A. – Ph. D. (Engineering), Leading Researcher. Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (12, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: svetakov2021@gmail.com.

Kiseleva Tatyana Yu. – D. Sc. (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Associate Professor. Lomonosov Moscow State University (1, Leninskie Gory Str., 119991, Moscow, Russian Federation). E-mail: kiseleva.tyu@gmail.com.

Devyatkina Evgeniya T. – Researcher. Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry of the SB of the RAS (18, Kutateladze Str., 630128, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: devyatkina@solid.nsc.ru

Vosmerikov Sergey V. – Researcher. Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry of the SB of the RAS (18, Kutateladze Str., 630128, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: vosmerikov@solid.nsc.ru.

Veremey Ilya S. – Technician. Joint United Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (12, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: stetarum@gmail.com.

Lyakhov Nikolay Z. – Academician, D. Sc. (Chemistry), Chief Researcher. Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry of the SB of the RAS (18, Kutateladze Str., 630128, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: lyakhov@solid.nsc.ru.

ISSN 1561-8323 (Print)
ISSN 2524-2431 (Online)

АГРАРНЫЕ НАУКИ
AGRARIAN SCIENCES

УДК 636.4.084.11:591.5
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-3-377-384>

Поступило в редакцию 24.05.2022
Received 24.05.2022

**А. Н. Соляник, академик И. П. Шейко, Д. Н. Ходосовский, А. А. Хоченков,
А. С. Петрушко, И. И. Рудаковская, В. А. Безмен, М. В. Джумкова**

*Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по животноводству,
Жодино, Республика Беларусь*

**ИЗУЧЕНИЕ ПРЕОБЛАДАЮЩИХ ВИДОВ АКТИВНОСТИ
У МАТОЧНОГО ПОГОЛОВЬЯ СВИНЕЙ В УСЛОВИЯХ
ПРОМЫШЛЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ**

Аннотация. Изменение внешних условий приводит к перестройке адаптивного поведения животных, их двигательной активности, что позволяет использовать этологические свойства для оценки состояния организма при различных способах производства. В связи с этим назрела острая необходимость в тотальном мониторинге состояния здоровья и активности свиней. В сообщении представлены результаты изучения влияния различных видов стресса на поголовье свиней в период их выращивания в условиях промышленной технологии. Исследования проводили в условиях свинокомплекса ГП «ЖодиноАгроПлемЭлита» на группах подсосных свиноматок, содержащихся в идентичных условиях, на основании мониторинга по сезонам года в следующем алгоритме: соблюдение критериев комфорта, снижение влияния стресса, повышение статуса здоровья, увеличение продуктивности. Изучены преобладающие виды активности у свиноматок в условиях промышленного комплекса. Установлено, что преобладание комфортной активности среди прочих видов способствует повышению жизнеспособности вынашиваемого потомства. Виды активности свиноматок неразрывно связаны с мотивациями, т. е. со стремлением животных к удовлетворению ведущих потребностей организма. Выявлены имеющие место примеры высокой и низкой пищевой мотивации. Установлено, что появление дополнительного пространства, создание физических и визуальных барьеров для защиты более покорных свиноматок окажут положительное влияние на снижение общей агрессии.

Ключевые слова: свиноматки, стресс, виды активности, мотивации

Для цитирования. Изучение преобладающих видов активности у маточного поголовья свиней в условиях промышленной технологии / А. Н. Соляник [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2022. – Т. 66, № 3. – С. 377–384. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-3-377-384>

**Alla N. Solyanik, Academician Ivan P. Sheyko, Dmitry N. Hodosovskiy, Andrei A. Khochenkov,
Aleksandr S. Petrushko, Inessa I. Rudakovskaya, Vladimir A. Bezmen, Marina V. Jumkova**

*Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Animal Breeding,
Zhodino, Republic of Belarus*

**STUDY OF THE PREDOMINANT TYPES OF THE ACTIVITY
OF SOWS UNDER THE ON-FARM CONDITIONS**

Abstract. A change in the external conditions leads to restructuring the adaptive behavior of animals, their motor activity, which makes it possible to use ethological properties to assess the body state in different production modes. In this regard, there is an urgent need for total monitoring of the health status and activity of pigs. The article contains the results on the effect of different-type stress on the pig stock during the rearing period under on-farm conditions. The studies were carried out at the pig farm of the State Enterprise “ZhodinoAgroPlemElita” in the groups of lactating sows kept under identical conditions, based on monitoring by year seasons in the following algorithm: complying with comfort criteria, reducing the stress impact, improving the health status, increasing the productivity. The predominant activity types of sows under on-farm conditions have been studied. It has been found that the predominance of the comfort activity among other types contributes to the offspring viability. Types of the activity of sows are inextricably linked to motivations, that is, the desire of animals to satisfy the priority needs of the body. Examples of high and low food motivation have been identified. Extra space, physical and visual barriers to protect more submissive sows have been found to have a positive effect on reducing overall aggression.

Keywords: sows, stress, types of activity, motivations

For citation. Solyanik A. N., Sheyko I. P., Hodosovskiy D. N., Khochenkov A. A., Petrushko A. S., Rudakovskaya I. I., Bezmen V. A., Jumkova M. V. Study of the predominant types of the activity in sows under the on-farm conditions. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2022, vol. 66, no. 3, pp. 377–384 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-3-377-384>

Введение. Изменение внешних условий приводит к перестройке адаптивного поведения животных, их двигательной активности, что позволяет использовать этологические свойства для оценки состояния организма при различных способах производства [1, с. 44–57; 2].

Стресс – одна из актуальных проблем в современной зоотехнии и ветеринарии. Его воздействия на организм в зависимости от многих факторов могут иметь как положительные, так и отрицательные последствия. Стресс резко повышает защитные силы организма, позволяя животному справиться с болезнью, помогает организму адаптироваться, однако в случае истощения защитных сил приводит к необратимым патологическим последствиям для животного или даже к гибели. С точки зрения исследования благополучия животных, особое внимание уделяется именно отрицательным последствиям стресса, которым подвергаются животные, содержащиеся в искусственно созданной среде, в частности, на фермах. Стрессовое воздействие вызывает изменения практически во всех системах организма, когда животное сталкивается с неблагоприятными физическими или эмоциональными условиями [3; 4]. Отрицательные последствия воздействия различных стресс-факторов особенно ощутимы при интенсивном промышленном свиноводстве, поскольку в результате интенсификации многие стада оказались сконцентрированы на территории комплекса, что привело к появлению новых болезней [1, с. 44–57].

Исследования отечественных и зарубежных ученых, а также наблюдения практиков показывают, что на поведение и продуктивность сельскохозяйственных животных оказывают влияние многочисленные факторы: физические (температура, влажность, солнечная и ионизирующая радиация, шумы, движение воздуха); химические (газы в окружающем воздухе, химические вещества, применяемые в животноводстве и растениеводстве); кормовые (недокорм и перекорм, недостаточное и неполноценное питание животных, использование недоброкачественных кормов и воды и др.); технологические (различная плотность размещения, малый фронт кормления и водопоя, резкая смена режимов содержания и др.); транспортные (погрузка и выгрузка, перевозка животных различными видами транспорта); биологические (возбудители инфекционных и инвазионных заболеваний, прививки, влияние животных других видов); психические (ранговые между животными, а также между животными и ухаживающим персоналом) и др. Все это влияет на благополучие животных, как физическое, так и психическое [1–3; 5; 6].

Одним из важнейших внешних климатических физических факторов среды, оказывающих непрерывное влияние на организм животных, является температура. Изменение ее может быть связано как с изменением климатических условий, так и с характером технологии содержания. Пределы колебаний температур, обеспечивающих зону комфорта свиней, сравнительно невелики и находятся в диапазоне 20–23 °С. Пределы колебания температур зоны комфорта, установленные разными авторами, отличаются [6–11]. Это объясняется влиянием на данные показатели многих факторов: кормления, адаптации, выносливости животного, климатических условий, возраста. Стрессовая реакция, возникающая при отъеме, ослабляет организм поросят и увеличивает риск возникновения заболеваний [12; 13]. В последние годы ветеринарная обстановка на свинокомплексах усложнилась из-за распространения целого ряда заболеваний вирусной природы, прежде всего репродуктивно-респираторного синдрома свиней, цирковирусной и парвовирусной инфекции, африканской чумы свиней. Против этих заболеваний эффективных средств лечения не разработано.

В оценке окружающей среды животными ведущая роль принадлежит *анализаторам*, способным воспринимать различные раздражители малой силы с высокой степенью их дифференциации. У свиней хорошо развит слух, обоняние, они различают сладкое, горькое и соленое, у них хорошо развито осязание, особенно в области рыла, а также температурная чувствительность. Прикладная этология, основываясь на теории, позволяет обнаруживать черты поведения,

потенциально влияющие на продуктивность. К сожалению, в современном животноводстве условия содержания часто приводят к отклонениям от нормального поведения [2; 14; 15].

Проблемы поведения, связанные с продуктивностью, обусловлены условиями интенсивного содержания, комфортности в различных условиях, различной скоростью роста поросят одного возраста. При планировании среды обитания необходимость адекватного поведения следует учитывать в такой же степени, как потребность в кормлении и микроклимате. В связи с этим назрела острая необходимость в тотальном мониторинге состояния здоровья и активности свиней. Проведенные исследования в области комфортности содержания молодняка свиней показали, что условия содержания и кормления, уход за животными, обуславливающие состояние их комфорта, можно определить посредством анализа поведенческих предпочтений при выборе различных предложенных вариантов технологии; предпочтения животных связаны с пищевым и комфортным поведением, и чтобы обеспечить благополучие молодняка свиней, необходимо предоставлять ему возможности для реализации потребностей, заложенных в биологии организма [2; 10; 14; 16; 17].

Таким образом, вопрос разработки технологических приемов повышения комфортности условий содержания свиней для снижения стрессовой нагрузки в условиях промышленной технологии производства является актуальным. Решение его позволит значительно сократить затраты на производство товарной свинины и повысить конкурентоспособность отечественного свиноводства.

Цель исследований – изучить влияние различных видов стресса на поголовье свиней в период их выращивания в условиях промышленной технологии.

Материалы и методы исследования. Экспериментальную работу проводили в условиях свинокомплекса Государственного предприятия «ЖодиноАгроПлемЭлита» на группах подсосных свиноматок. При общих равных условиях содержания и кормления животных в секторах определялись критические точки, где в наибольшей степени имеют место стресс-факторы. Исследования проводились на основании мониторинга по сезонам года в следующем алгоритме: соблюдение критериев комфортности, снижение влияния стресса, повышение статуса здоровья, увеличение продуктивности.

В результате исследований изучали формирование поведенческого статуса маточного поголовья свиней в критические периоды воспроизводства и выращивания. Также проводили мониторинг параметров микроклимата в секторах и определение показателей продуктивности и сохранности свиней. В ходе исследований использованы зоотехнические и зооигиенические методы. Этологические исследования проведены на основе визуального наблюдения с использованием хронометража и методики В. И. Великжанина [18].

В ходе исследований изучались: внешний вид животного и поведенческая активность (соответствие критериям здорового животного, виды активности, виды отклонений в поведении животных); зооигиенические показатели (температура (°C) и относительная влажность (%) внутреннего воздуха – прибором комбинированным «ТКА-ПКМ»), скорость движения воздуха (м/с) – комбинированным прибором «Testo», концентрация аммиака (мг/м³) – комбинированным прибором АНКAT-7664).

Биометрическая обработка цифрового материала, полученного в экспериментальных исследованиях, проводилась по методике П. Ф. Рокицкого [19] с использованием ЭВМ.

Результаты и их обсуждение. Этологические наблюдения позволяют решать актуальные для промышленного производства задачи. Методы изучения поведения свиней разнятся в зависимости от поставленной цели. Самый простой – непосредственный анализ этологического статуса, наблюдение за свиноматками в период их ежедневной жизнедеятельности.

За отчетный период изучены преобладающие виды активности у свиноматок в условиях промышленного комплекса. При изучении популяционных отношений основное внимание обращают на реакции возбуждения, которые связаны с механизмом биологической адаптации свиноматок друг к другу и к условиям среды [20].

В течение исследований мы проводили мониторинг показателей микроклимата во всех секторах для содержания маточного поголовья (табл. 1).

Т а б л и ц а 1. Параметры микроклимата в секциях для содержания холостых, супоросных и подсосных свиноматок, $M \pm m$ T a b l e 1. Microclimate parameters in the sections of keeping single, pregnant, and sucking sows, $M \pm m$

Показатель Index	Холостые и осеменяемые Single and inseminated	Супоросные Pregnant	Подсосные Suckling
Температура внутреннего воздуха, °С:			
на высоте 0,5 м	16,6 ± 0,25	17,1 ± 0,12	20,6 ± 0,15
на высоте 1,5 м	17,5 ± 0,46	17,9 ± 0,13	20,9 ± 0,17
Содержание аммиака, мг/м ³ :			
на высоте 0,5 м	8,2 ± 0,15	13,7 ± 0,27	5,53 ± 0,11
на высоте 1,5 м	10,6 ± 0,67	14,4 ± 0,27	6,27 ± 0,10
Скорость движения воздуха, м/с			
на высоте 0,5 м	0,16 ± 0,02	0,13 ± 0,04	0,12 ± 0,05
на высоте 1,5 м	0,18 ± 0,02	0,17 ± 0,06	0,13 ± 0,04
Относительная влажность внутреннего воздуха, %:			
на высоте 0,5 м	73,8 ± 2,2	69,8 ± 0,51	69,9 ± 0,15
на высоте 1,5 м	72,4 ± 2,4	68,7 ± 0,24	62,7 ± 0,27

Наблюдения за состоянием микроклимата в здании для содержания холостых и осеменяемых маток показали, что в зимний период в здании поддерживался стабильный температурный режим внутреннего воздуха. Так, этот показатель колебался в пределах 16,6–17,5 °С, при этом относительная влажность внутреннего воздуха находилась в пределах от 72,4 до 73,8 %, что соответствует нормативным требованиям.

Существенными факторами в формировании микроклимата помещения являются воздухообмен и скорость движения воздуха. Согласно РНТП-1–2004, скорость движения воздуха в зимний период наблюдений не превышала 0,3 м/с. Уровень аммиака также был в пределах допустимых норм и изменялся от 8,2 до 10,6 мг/м³.

Температура воздуха в секторе для супоросных свиноматок изменялась от 17,1 до 17,9 °С, она регулировалась автоматической подачей воздуха и удалением отработанного. Скорость движения воздуха находилась в пределах от 0,13 до 0,17 м/с. Уровень аммиака не превышал допустимый показатель и колебался от 13,7 до 14,4 мг/м³. Относительная влажность изменялась от 68,7 до 69,8 %. Стоит отметить, что все показатели находились в соответствии с нормами РНТП-1–2004 и не превышали допустимый уровень.

Мониторинг показателей микроклимата в секторах для опоросов в весенне-летний период показал, что содержание в воздухе аммиака изменялось от 13 до 16 мг/м³, т. е. ниже допустимого уровня. Температура воздуха в помещении изменялась от 19,2 до 24,8 °С, что находилось в пределах допустимых норм для маточника. Скорость движения воздуха была несколько ниже предельно допустимого значения и составляла 0,21–0,24 м/с. Относительная влажность воздуха была в пределах норм и изменялась от 56 до 62 %. Температура внутри помещения также соответствовала норме и изменялась от 20 до 22 °С.

Проведение опоросов и выращивание поросят под свиноматками – одна из самых важных стадий в технологии производства свинины. На крупных свиноводческих комплексах, где поросят от маток отнимают в 28-дневном возрасте, распространены в основном станки типа ССИ-2. Каждый такой станок, размером 360 × 185 см, имеет два боковых отделения для поросят размерами 205 × 62 см, между которыми расположена клетка для фиксированного содержания свиноматки размером 185 × 61 см.

Изучение влияния температуры содержания на продуктивность холостых, супоросных и подсосных свиноматок мясного направления продуктивности проводили при температуре, предусмотренной РНТП-1–2004 (контрольная группа) и предлагаемым режимом (опытная группа). Полученные результаты представлены в табл. 2.

Продуктивность свиноматок контрольной группы составила 11,2 поросенка, в то время как в опытной – 11,8 поросенка, или на 0,6 гол. больше. Живых, хорошо развитых поросят в конт-

Т а б л и ц а 2. Продуктивность основных свиноматок в зависимости от температуры содержания в холостой и супоросный периоды

T a b l e 2. Productivity of main sows depending on the sow keeping temperature in single and pregnant periods

Температура Temperature	Количество поросят, голов Number of piglets, heads				Средняя масса одного поросенка, кг Average weight of one piglet, kg
	всего total	живых alive	слабых weak	мертвых dead	
13–19 °С (контрольная)	11,2 ± 0,16	10,0 ± 0,18	0,8 ± 0,02	0,4 ± 0,01	1,3 ± 0,12
17–23 °С (опытная)	11,8 ± 0,19	10,6 ± 0,17	0,7 ± 0,03	0,5 ± 0,01	1,3 ± 0,13

рольной группе в среднем на опорос получено 10 гол., тогда как в опытной группе этот показатель составил 10,6 гол., или на 0,6 поросенка больше. Слабых поросят больше было в контрольной группе на 0,1 гол. Количество мертворожденных поросят в опытной группе было на 0,1 гол. меньше по отношению к контролю. По показателю массы одного поросенка при рождении особых различий не установлено. Таким образом, содержание основных маток при температуре 17–23 °С в помещении позволяет повысить многоплодие на 0,6 поросенка.

Этологические реакции свиней – важный биотехнологический признак способности приспосабливаться к изменяющимся условиям содержания. В результате проведенного мониторинга этологического статуса свиноматок установлены периоды проявления различных видов их активности, которые во многом формируют тип поведения: характер и интенсивность движений; пищевые реакции; интенсивность роста и развития, продуктивность.

Социальная активность. Групповое поведение, как форма поведенческой адаптации, предполагает разный уровень кооперации и конкуренции в группе свиней, а именно в составе определенного скопления животных на ограниченной территории. Его разновидностью является социальное поведение как высокий уровень взаимоотношений членов группы животных.

Иерархическая и коммуникационная активность. Свиньи, как животные с высокоразвитой психикой, выделяются по характеру агрессивных действий при выяснении межличностных отношений. Провоцируют подобное поведение свиней технологические просчеты – высокая плотность посадки и узкий фронт кормления. Свою агрессивность свиньи проявляют прежде всего у кормушек и за жизненное пространство. Агрессия свиней повышается в помещениях с плохим микроклиматом и при плохом обращении с животными со стороны обслуживающего персонала [14]. Установлено, что у стресс-чувствительных маток выше число драк (3,7 %) и меньшие затраты времени на отдых (32–37 %), потребление корма и воды (17,5–18,2 %). Столкновения чаще происходили среди маток низших и средних рангов.

Пищедобывательная активность. Если свиноматка активно потребляет корм и воду и не создает при этом дискомфорта для поросят, это свидетельствует о ее благополучии. О дискомфорте сигнализирует наличие у свиноматки холостой жвачки (показатель стереотипного поведения). Если животное усвоило это один раз, то данная привычка у него сохранится навсегда, поэтому необходимо: протестировать корм на соответствие по уровню питательности, обратить внимание на оптимальность показателей микроклимата, наличие сквозняков и так далее. При групповом содержании свиней бессистемная раздача кормов стимулирует агрессивность у животных, которая приводит к травматизму, снижению среднесуточных привесов и перерасходу кормов. Это отрицательно сказывается на общем состоянии животных, поэтому их свободное время следует ограничить.

Комфортная активность. Комфортное поведение является разновидностью манипулирования и может быть подразделено на несколько видов: очищение тела, потряхивание, почесывание о предмет, катание по субстрату (пыль, зола, песок, грязь), купание (в воде, золе, пыли). Этот вид активности обеспечивает решение одной задачи – устранение состояния дискомфорта, которое развивается на основе антисанитарного состояния тела (пот, грязь, паразиты, мелкие травмы), а также в результате однообразного положения тела в пространстве. Кроме того, дискомфорт может развиваться вследствие социальной активности животных, а также под влиянием неблагоприятных явлений в среде обитания.

При анализе активности свиноматок установлено, что виды активности неразрывно связаны с мотивациями, т. е. к стремлению животных к удовлетворению ведущих потребностей организма. Различают мотивации биологические (голод, жажда, агрессии, дефекация и др.) и социальные (высшие, сложные, вторичные). Выявлены имеющие место примеры высокой и низкой пищевой мотивации.

При анализе активности в период глубокой супоросности установлено, что во второй половине супоросности затраты времени на потребление корма уменьшились на 6–8 %. Больше времени супоросные свиноматки использовали на отдых (37,0–38,6 %), меньше – на передвижение (20,0–22,6 %) и потребление корма (17,5–19,0 %). В конце супоросности возросла частота испражнений.

Свиноматки, у которых есть молоко в необходимом количестве, обладают более сильной пищевой мотивацией. Процесс потребления корма занимает у них больше времени, они поедают влажный корм весь до чистой кормушки без перерывов. Поросята у таких маток большую часть времени между сосаниями отдыхают. После сосания матки поросята возвращаются на коврик. У маломолочных маток пищевая мотивация низкая, потребление корма у них занимает меньшее количество времени, они периодически прерывают потребление корма и отдыхают. Поросята у таких маток ходят по станку в поисках еды и гораздо меньше отдыхают на коврике. Их двигательная активность связана с поиском пищи и недокормом. Если свиноматка отказалась от приема корма, кал очень твердой консистенции, а поросята ведут себя беспокойно, это также свидетельствует о ее низкой молочной продуктивности.

Заключение. Изучены преобладающие виды активности у свиноматок в условиях промышленного комплекса. Установлено, что преобладание комфортной активности среди прочих видов способствует повышению жизнеспособности вынашиваемого потомства. Так, при неблагоприятных условиях содержания свиноматок рождаются поросята уже с заранее ослабленной адаптивной системой, т. е. слабой жизнеспособностью. Стресс у свиноматки в период закладки зародышевых листков (6–10 сут. супоросности свиноматки) повышает эмбриональную смертность.

Анализируя активность свиноматок, установили, что виды активности неразрывно связаны с мотивациями. Выявлены имеющие место примеры высокой и низкой пищевой мотивации. При анализе активности в период глубокой супоросности установлено, что во второй половине супоросности уменьшаются затраты времени на потребление корма (на 6–8 %), а в конце супоросности – возрастает частота испражнений. Больше времени супоросные свиноматки использовали на отдых (37,0–38,6 %), меньше – на передвижение (20,0–22,6 %) и потребление корма (17,5–19,0 %). У стресс-чувствительных маток выше число драк (3,7 %) и меньшие затраты времени на отдых (32–37 %), потребление корма и воды (17,5–18,2 %). Столкновения чаще происходили среди маток низших и средних рангов.

Установлено, что появление дополнительного пространства, создание физических и визуальных барьеров для защиты более покорных свиноматок окажут положительное влияние на снижение общей агрессии.

Список использованных источников

1. Комлацкий, В. И. Поведение свиней в условиях интенсивного ведения отрасли / В. И. Комлацкий. – Краснодар, 1985. – 80 с.
2. Types of Higher Nervous Activity in Pigs: Characteristics of Behavior and Effects of Technological Stress / O. V. Dan-chuk [et al.] // *Neurophysiology*. – 2021. – Vol. 52, N 5. – P. 358–366. <https://doi.org/10.1007/s11062-021-09892-7>
3. Плященко, С. И. Стрессы – благо или зло? / С. И. Плященко. – Минск, 1991. – 174 с.
4. Effect of adaptogens on the quality of pig meat / K. S. Ostrenko [et al.] // *Ukrainian Journal of Ecology*. – 2020. – Vol. 10, N 1. – P. 344–348. https://doi.org/10.15421/2020_54
5. Татулов, Ю. В. Снижение стрессов при транспортировании свиней / Ю. В. Татулов, Т. В. Косачева // *Мясные технологии*. – 2011. – № 7(103). – С. 26–27.
6. Behavior Comparison During Chronic Heat Stress in Large White and Creole Pigs Using Image-Analysis / M. Bon-neau [et al.] // *Frontiers in Animal Science*. – 2021. – Vol. 2. – P. 1–11. <https://doi.org/10.3389/fanim.2021.784376>
7. Changes in growth performance, feeding behaviors, and posture behaviors of growing pigs subjected to low-intensity heat stress / L. E. Anderson [et al.] // *Journal of Animal Science*. – 2020. – Vol. 98, N 4. – P. 3–4. <https://doi.org/10.1093/jas/skaa278.006>

8. Review: What have we learned about the effects of heat stress on the pig industry? / F. Liu [et al.] // *Animal*. – 2021. – Art. 100349. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2021.100349>
9. Biology of heat stress; the nexus between intestinal hyperpermeability and swine reproduction / E. J. Mayorga [et al.] // *Theriogenology*. – 2020. – Vol. 154. – P. 73–83. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2020.05.023>
10. Feeding behavior of grow-finish swine and the impacts of heat stress / A. J. Cross [et al.] // *Translational Animal Science*. – 2020. – Vol. 4, N 2. – P. 986–992. <https://doi.org/10.1093/tas/txaa023>
11. Клименко, А. С. Тепловой стресс у свиней и его профилактика / А. С. Клименко, Д. А. Трухин // Свиноводство. – 2012. – № 2. – С. 31–32.
12. Макрушин, П. В. Этология и продуктивность сельскохозяйственных животных / П. В. Макрушин, В. А. Каптюшин. – Саратов, 1988. – 56 с.
13. The Effect of Lithium Salt with Ascorbic Acid on the Antioxidant Status and Productivity of Gestating Sows / K. Ostrenko [et al.] // *Animals*. – 2022. – Vol. 12, N 7. – P. 915. <https://doi.org/10.3390/ani12070915>
14. Комлацкий, В. И. Этологический комфорт – фактор обеспечения высокой продуктивности свиней / В. И. Комлацкий // Научные основы повышения продуктивности сельскохозяйственных животных: сб. науч. тр. 4-й Междунар. науч.-практ. конф. – Краснодар, 2011. – Ч. 1. – С. 52–54.
15. Факторы снижения стрессовой нагрузки в критические периоды выращивания молодняка свиней / А. Н. Шацкая [и др.] // Зоотехническая наука Беларуси. – Жодино, 2017. – Т. 52, ч. 2. – С. 234–243.
16. Денисова, Л. К. Стрессы у свиней и меры их профилактики / Л. К. Денисова // Свиноводство. – 2018. – № 7. – С. 57–58.
17. Хаймиг, Д. Гонки за комфортом / Д. Хаймиг // Новое сельское хозяйство. – 2016. – № 2. – С. 44–45.
18. Изучение поведения сельскохозяйственных животных в производственных условиях: методические рекомендации по изучению поведения сельскохозяйственных животных / В. И. Великжанин [и др.]. – Ленинград, 1975. – 55 с.
19. Рокицкий, П. Ф. Биологическая статистика / П. Ф. Рокицкий. – Изд. 3-е, испр. – Минск, 1973. – 320 с.
20. Девиантное поведение маточного поголовья свиней на промышленных комплексах / А. Н. Соляник [и др.] // Актуальные проблемы интенсивного развития животноводства: сб. науч. тр. – Горки, 2020. – Вып. 23, ч. 2. – С. 125–133.

References

1. Komlatsky V. I. *Behavior of pigs under conditions of intensive management of the industry*. Krasnodar, 1985. 80 p. (in Russian).
2. Danchuk O. V., Broshkov M. M., Karpovsky V. I., Bobrytska O. M., Tsvivlikhovskiy M. I., Tomchuk V. A., Trokoz V. O., Kovalchuk I. I. Types of Higher Nervous Activity in Pigs: Characteristics of Behavior and Effects of Technological Stress. *Neurophysiology*, 2021, vol. 52, no. 5, pp. 358–366. <https://doi.org/10.1007/s11062-021-09892-7>
3. Plyashchenko S. I. *Stress its good or bad?* Minsk, 1991. 173 p. (in Russian).
4. Ostrenko K. S., Lemiasheuski V. O., Ovcharova A. N., Galochkina V. P., Sofronova O. V. Effect of adaptogens on the quality of pig meat. *Ukrainian Journal of Ecology*, 2020, vol. 10, no. 1, pp. 344–348. https://doi.org/10.15421/2020_54
5. Tatulov Yu. V., Kosacheva T. V. Reducing stress during transportation of pigs. *Mjasnye tehnologii* [Meat technologies], 2011, no. 7(103), pp. 26–27 (in Russian).
6. Bonneau M., Pouillet N., Beramice D., Dantec L., Canario L., Gourdine J.-L. Behavior Comparison During Chronic Heat Stress in Large White and Creole Pigs Using Image-Analysis. *Frontiers in Animal Science*, 2021, vol. 2, pp. 1–11. <https://doi.org/10.3389/fanim.2021.784376>
7. Anderson L. E., Holt J. P., van Heugten E., Poole D. H. Changes in growth performance, feeding behaviors, and posture behaviors of growing pigs subjected to low-intensity heat stress. *Journal of Animal Science*, 2020, vol. 98, no. 4, pp. 3–4. <https://doi.org/10.1093/jas/skaa278.006>
8. Liu F., Zhao W., Le H. H., Cottrell J. J., Green M. P., Leury B. J., Dunshea F. R., Bell A. W. Review: What have we learned about the effects of heat stress on the pig industry? *Animal*, 2021, art. 100349. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2021.100349>
9. Mayorga E. J., Ross J. W., Keating A. F., Rhoads R. P., Baumgard L. H. Biology of heat stress; the nexus between intestinal hyperpermeability and swine reproduction. *Theriogenology*, 2020, vol. 154, pp. 73–83. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2020.05.023>
10. Cross A. J., Brown-Brandl T. M., Keel B. N., Cassady J. P., Rohrer G. A. Feeding behavior of grow-finish swine and the impacts of heat stress. *Translational Animal Science*, 2020, vol. 4, no. 2, pp. 986–992. <https://doi.org/10.1093/tas/txaa023>
11. Klimentko A. S., Truhin D. A. Heat stress in pigs and its prevention. *Svinovodstvo = Pig breeding*, 2012, no. 2, pp. 31–32 (in Russian).
12. Makrushin P. V., Kaptyushin V. A. *Ethology and productivity of farm animals*. Saratov, 1988. 56 p. (in Russian).
13. Ostrenko K., Nekrasov R., Ovcharova A., Lemiasheuski V., Kutin I. The Effect of Lithium Salt with Ascorbic Acid on the Antioxidant Status and Productivity of Gestating Sows. *Animals*, 2022, vol. 12, no. 7, p. 915. <https://doi.org/10.3390/ani12070915>
14. Komlatsky V. I. Ethological comfort – a factor in ensuring high productivity of pigs. *Nauchnye osnovy povysheniya produktivnosti sel'sko-hoz'jajstvennykh zhivotnykh: sbornik nauchnykh trudov 4-oj Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Scientific bases for increasing the productivity of farm animals: a collection of scientific papers of the 4th International scientific and practical conference]. Krasnodar, 2011, part 1, pp. 52–54 (in Russian).
15. Shatskaya A. N., Khodosovsky D. N., Khchenkov A. A., Rudakovskaya I. I., Bezmen V. A., Petrushko A. S., Matyushonok T. A., Shamonina A. I. Factors of reducing stress load during the critical periods of rearing young pigs. *Zootekhnicheskaya nauka Belarusi* [Zootechnical Science of Belarus]. Zhodino, 2017, vol. 52, part 2, pp. 234–243 (in Russian).

16. Denisova L. K. Stress in pigs and measures for their prevention. *Svinovodstvo = Pig breeding*, 2018, no. 7, pp. 57–58 (in Russian).
17. Heimig D. Race for comfort. *Novoe sel'skoe hozjajstvo* [New agriculture], 2016, no. 2, pp. 44–45 (in Russian).
18. Velikzhanin V. I. et al. *Studying the behavior of farm animals under production conditions: guidelines for studying the behavior of farm animals*. Leningrad, 1975. 55 p. (in Russian).
19. Rokitsky P. F. *Biological statistics*, ed. 3rd, rev. Minsk, 1973. 320 p. (in Russian).
20. Solyanik A. N., Khodosovsky D. N., Khochenkov A. A., Bezmen V. A., Petrushko A. S., Rudakovskaya I. I., Matyushonok T. A. Deviant behavior of the breeding stock of pigs at industrial complexes. *Aktual'nye problemy intensivnogo razvitiya zhivotnovodstva* [Actual problems of intensive development of animal husbandry]. Gorki, 2020, vol. 23, part 2, pp. 125–133 (in Russian).

Информация об авторах

Соляник Алла Николаевна – канд. с.-х. наук, доцент, вед. науч. сотрудник. НПЦ НАН Беларуси по животноводству (ул. Фрунзе, 11, 222163, Жодино, Республика Беларусь). E-mail: nti_belniig@mail.ru.

Шейко Иван Павлович – академик, д-р с.-х. наук, профессор, первый заместитель генерального директора. НПЦ НАН Беларуси по животноводству (ул. Фрунзе, 11, 222163, Жодино, Республика Беларусь). E-mail: lab.breed.selec.pig@yandex.by.

Ходосовский Дмитрий Николаевич – канд. с.-х. наук, доцент, заведующий лабораторией. НПЦ НАН Беларуси по животноводству (ул. Фрунзе, 11, 222163, Жодино, Республика Беларусь). E-mail: hod_1963@list.ru.

Хоченков Андрей Алексеевич – д-р с.-х. наук, профессор, гл. науч. сотрудник. НПЦ НАН Беларуси по животноводству (ул. Фрунзе, 11, 222163, Жодино, Республика Беларусь). E-mail: 28111959-@mail.ru.

Петрушко Александр Сергеевич – канд. с.-х. наук, вед. науч. сотрудник. НПЦ НАН Беларуси по животноводству (ул. Фрунзе, 11, 222163, Жодино, Республика Беларусь). E-mail: petrushko71@list.ru.

Рудаковская Инесса Ивановна – канд. с.-х. наук, доцент, вед. науч. сотрудник. НПЦ НАН Беларуси по животноводству (ул. Фрунзе, 11, 222163, Жодино, Республика Беларусь). E-mail: nti_belniig@mail.ru.

Безмен Владимир Анатольевич – канд. с.-х. наук, доцент, вед. науч. сотрудник. НПЦ НАН Беларуси по животноводству (ул. Фрунзе, 11, 222163, Жодино, Республика Беларусь). E-mail: nti_belniig@mail.ru.

Джумкова Марина Валерьевна – канд. с.-х. наук, ведущий редактор. НПЦ НАН Беларуси по животноводству (ул. Фрунзе, 11, 222163, Жодино, Республика Беларусь). E-mail: nti_belniig@mail.ru.

Information about the authors

Solyanik Alla N. – Ph. D. (Agrarian), Associate Professor, Leading Researcher. Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus on Animal Breeding (11, Frunze Str., 222163, Zhodino, Republic of Belarus). E-mail: nti_belniig@mail.ru.

Sheiko Ivan P. – Academician, D. Sc. (Agrarian), Professor, First Deputy Director General. Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus on Animal Breeding (11, Frunze Str., 222163, Zhodino, Republic of Belarus). E-mail: lab.breed.selec.pig@yandex.by.

Khodosovsky Dmitry N. – Ph. D. (Agrarian), Associate Professor, Head of the Laboratory. Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus on Animal Breeding (11, Frunze Str., 222160, Zhodino, Republic of Belarus). E-mail: hod_1963@list.ru.

Khochenkov Andrei A. – D. Sc. (Agrarian), Professor, Chief Researcher. Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus on Animal Breeding (11, Frunze Str., 222163, Zhodino, Republic of Belarus). E-mail: 28111959-@mail.ru.

Petrushko Aleksandr S. – Ph. D. (Agrarian), Leading Researcher. Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus on Animal Breeding (11, Frunze Str., 222163, Zhodino, Republic of Belarus). E-mail: petrushko71@list.ru.

Rudakovskaya Inessa I. – Ph. D. (Agrarian), Leading Researcher. Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus on Animal Breeding (11, Frunze Str., 222163, Zhodino, Republic of Belarus). E-mail: nti_belniig@mail.ru.

Bezmen Vladimir A. – Ph. D. (Agrarian), Associate Professor, Leading Researcher. Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus on Animal Breeding (11, Frunze Str., 222163, Zhodino, Republic of Belarus). E-mail: nti_belniig@mail.ru.

Jumkova Marina V. – Ph. D. (Agrarian), Leading Editor. Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus on Animal Breeding (11, Frunze Str., 222163, Zhodino, Republic of Belarus). E-mail: nti_belniig@mail.ru.