

ДОКЛАДЫ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ

2024. Т. 68. № 5

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

В. Л. Гурский

главный ученый секретарь Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь

(заместитель главного редактора)

А. В. Кильчевский

заместитель Председателя Президиума Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь

(заместитель главного редактора)

С. А. Чижик

первый 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

Т. И. Адуло, Институт философии Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь

В. В. Азаренко, Президиум Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь

О. Ю. Баранов, Президиум Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь

В. Г. Богдан, Президиум Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь

М. А. Богдасаров, Брестский государственный университет имени А. С. Пушкина, 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

А. А. Волчек, Брестский государственный технический университет, Республика Беларусь

С. В. Гапоненко, Институт физики имени Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь

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

А. Е. Дайнеко, Белорусский республиканский фонд фундаментальных исследований, Республика Беларусь

Н. Желев, Абергейский 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**, Национальная академия наук Беларуси, Республика Беларусь
Н. Н. Казанский, Институт лингвистических исследований Российской академии наук, Российская Федерация
И. А. Карпов, Белорусский государственный медицинский университет, Республика Беларусь
С. П. Карпов, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Российская Федерация
А. А. Коваленя, Президиум Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь
Э. И. Коломиец, Государственное научно-производственное объединение «Химический синтез и биотехнологии», 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. Г. Левашкевич, Президиум Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь
Н. М. Литвинко, Президиум Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь
В. Ф. Логиннов, Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь
П. С. Лопух, Белорусский государственный университет, Республика Беларусь
В. К. Лукашевич, Институт философии Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь
С. А. Лысенко, Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь
Г. Маркрам, Институт мозга, Центр неврологии и технологии Швейцарского федерального института технологий, Швейцарская Конфедерация
А. А. Махнач, Институт геологии Научно-производственного центра по геологии, Республика Беларусь
В. А. Орлович, Институт физики имени 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. П. Русак, Институт языкознания имени Якуба Коласа Центра исследований белорусской культуры, языка и литературы Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь
И. В. Саверченко, Институт литературоведения имени Янки Купалы Центра исследований белорусской культуры, языка и литературы Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь
В. А. Садовничий, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Российская Федерация
В. Г. Сафонов, Институт математики Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь
Н. В. Смехович, Институт истории Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь
Д. В. Тапальский, Институт физиологии Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь
А. В. Тузиков, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь
Тьяу Ван Минь, Вьетнамская академия наук и технологий, Социалистическая Республика Вьетнам
С. А. Усанов, Институт биорганической химии Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь
Ю. С. Харин, Научно-исследовательский институт прикладных проблем математики и информатики, Республика Беларусь
А. Цайлингер, Австрийская академия наук, Австрийская Республика
И. П. Шейко, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по животноводству, Республика Беларусь
А. Г. Шумилин, Президиум Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь
С. С. Щербаков, Президиум 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. 2024. Т. 68. № 5

Выходит на русском, белорусском и английском языках

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

Сдано в набор 17.10.2024. Выпуск в свет 30.10.2024. Формат 60×84¹/₈. Бумага офсетная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 10,23 Уч.-изд. л. 11,3. Тираж 142 экз. Заказ 214.

Цена: индивидуальная подписка – 14,01 руб.; ведомственная подписка – 32,74 руб.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Республиканское унитарное предприятие «Издательский дом «Беларуская навука».

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

© РУП «Издательский дом «Беларуская навука».
Доклады НАН Беларуси, 2024

DOKLADY OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS

2024. Vol. 68. No. 5

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)*

Editor-in-Chief

Vladimir G. Gusakov

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

Editorial Board

Sergey A. Chizhik

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

Vasily L. Gursky

Chief Scientific Secretary of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus
(Associate Editor-in-Chief)

Alexander V. Kilchevsky

Deputy 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

Tadeouch I. Adoulo, Institute of Philosophy of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus

Vladimir V. Azarenko, Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus

Oleg Yu. Baranov, Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus

Vasily G. Bogdan, Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus

Maxim A. Bogdasarov, Brest State A. Pushkin University, Republic of Belarus

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

Alexey Ye. Dayneko, Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research, Republic of Belarus

Sergey V. Gaponenko, B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, 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

Andrei I. Ivanets, Ministry of Education of the Republic of Belarus, Republic of Belarus

Igor A. Karpov, Belarusian State Medical University, Republic of Belarus

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

Nikolay S. Kazak, National Academy of Sciences of Belarus, 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

Emilia I. Kolomiets, State Research and Production Association “Chemical Synthesis and Biotechnology”, 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 G. Levashkevich, Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus
Nataliya M. Litvinko, Presidium 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
Petr S. Lopukh, Belarusian State University, Republic of Belarus
Vladimir K. Lukashevich, Institute of Philosophy of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus
Sergey A. Lysenko, 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
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. Rasha, Institute of Biology of the University of Latvia, Latvia
Baiba A. Rivza, Latvian Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Latvia
Valentina P. Rusak, Institute of Linguistics named after Yakub Kolas of the Center for Research of Belarusian Culture, Language and Literature of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus
Viktor A. Sadovnichiy, Lomonosov Moscow State University, Russian Federation
Vasily G. Safonov, Institute of Mathematics of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus
Ivan V. Saverchenko, Institute of Literary Studies named after Yanka Kupala of the Center for Research of Belarusian Culture, Language and Literature of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus
Sergey S. Shcherbakov, Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus
Ivan P. Sheyko, Scientific and Practical Center for Animal Breeding, Republic of Belarus
Alexander G. Shumilin, Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus
Nikolay V. Smekhovich, Institute of History of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus
Dmitry V. Tapalski, Institute of Physiology 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, Institute of Bioorganic Chemistry 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
Aliaksandr A. Volchak, Brest State Technical University, 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. 2024. Vol. 68. No. 5

Printed in Russian, Belarusian and English languages

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

Sent for press 17.10.2024. Output 30.10.2024. Format 60×84¹/₈. Offset paper.
Digital press. Printed sheets 10.23. Publisher’s signatures 11.3. Circulation 142 copies. Order 214.

Price: individual subscription – 14.01 BYN, departmental subscription – 32.74 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., 220084, Minsk, Republic of Belarus.

© RUE “Publishing House “Belaruskaya Navuka”.
Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

МАТЕМАТИКА

- Гутор А. Г., Тихонов С. В.** Корни многочленов с коэффициентами в кольцах с делением (на англ. яз.) 359

ФИЗИКА

- Потапова У. В., Феранчук С. И., Батяновский А. В., Матусков Д. С., Феранчук И. Д.** Квантовая запутанность в паре ионов цинка РНК-зависимой РНК-полимеразы флавивирусов и ее роль в реакции полимеризации 365

ХИМИЯ

- Костюк Н. Н., Дик Т. А., Цыганов А. Р.** Анализ спектральных характеристик фторсодержащих β -дикетонатов ванадия(III) 373

БИОЛОГИЯ

- Чушова Н. В., Щемелев В. М., Висмонт Ф. И., Чешик И. А.** Изменение содержания дофамина, серотонина, их предшественников и производных в префронтальной коре головного мозга молодых крыс-самцов при хроническом воздействии низкоинтенсивного электромагнитного поля 381
- Пантелеев С. В., Ветчинникова Л. В., Титов А. Ф., Кирьянов П. С., Баранов О. Ю.** Молекулярно-генетический анализ тканей древесины и коры прививок разных видов берез 390

МЕДИЦИНА

- Волкова Н. В., Аксёнова Е. А., Яцкив А. А., Солнцева А. В., Гончарова Р. И.** Ассоциация генов HLA II класса с аутоиммунными заболеваниями щитовидной железы у детей с сахарным диабетом 1 типа 395

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

- Какарека С. В., Круковская О. Ю.** Ретроспективная оценка выбросов диоксида серы и оксидов азота в атмосферный воздух от стационарных источников на территории Беларуси 404

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Покровский А. И., Хина Б. Б., Йонг Шю, Ши-Хонг Жанг, Баоченг Янг.** Влияние больших скоростей деформации на механическое поведение и структурообразование титанового сплава Ti-6Al-4V 413

СОЦИАЛЬНО-ГУМАНИТАРНЫЕ НАУКИ

- Дуктава Л. Г.** Нацыянальныя коды ў эпічных творах беларускай літаратуры мяжы XX–XXI стст. 421

АГРАРНЫЕ НАУКИ

- Тимошенко В. Н., Барановский М. В., Кажико О. А., Портной А. И., Музыка А. А.** Усовершенствованные приемы санитарной обработки транспортных молокопроводящих путей 429

ISSN 1561-8323 (Print)

ISSN 2524-2431 (Online)

CONTENTS*MATHEMATICS*

- Goutor A. G., Tikhonov S. V.** Roots of polynomials over division rings 359

PHYSICS

- Potapova U. V., Feranchuk S. I., Batyanovskii A. V., Matuskov D. S., Feranchuk I. D.** Quantum entangle in a zinc ion pair of RNA-dependent RNA polymerase of flaviviruses and its role in the polymerization reaction 365

CHEMISTRY

- Kostyuk N. N., Dick T. A., Tsyhanau A. R.** Analysis of spectral characteristics of fluorine containing vanadium(III) β -diketonates 373

BIOLOGY

- Chueshova N. V., Schemelev V. M., Vismont F. I., Cheshik I. A.** Changes in the content of dopamine, serotonin, their precursors and derivatives in the prefrontal cortex of the brain of young male rats under chronic exposure to low-intense electromagnetic field..... 381

- Panteleev S. V., Vetchinnikova L. V., Titov A. F., Kiryanov P. S., Baranov O. Yu.** Molecular genetic analysis of wood and bark tissue vaccinations of different-type birch..... 390

MEDICINE

- Volkova N. V., Aksenova E. A., Yatskiu H. A., Solntseva A. V., Goncharova R. I.** Association of HLA class II genes with autoimmune thyroid diseases in children with type 1 diabetes..... 395

EARTH SCIENCES

- Kakareka S. V., Krukowskaya O. Yu.** Retrospective assessment of sulfur dioxide and nitrogen oxide emissions from stationary sources in Belarus 404

TECHNICAL SCIENCES

- Pokrovsky A. I., Khina B. B., Yong Xu, Shi-Hong Zhang, Baocheng Yang.** Effect of high strain rates on the mechanical behavior and structure formation of the titanium alloy Ti-6Al-4V 413

SOCIAL SCIENCES AND HUMANITIES

- Duktava L. G.** National codes in the epic works of Belarusian literature at the turn of the XX-XXI centuries 421

AGRARIAN SCIENCES

- Tsimoshanka U. N., Baranovsky M. V., Kazheko O. A., Partny A. I., Muzyka A. A.** Improved methods of sanitary treatment of milk delivery lines..... 429

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

МАТЕМАТИКА
MATHEMATICS

UDC 512.552
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2024-68-5-359-364>

Received 23.04.2024
Поступило в редакцию 23.04.2024

Alina G. Goutor, Sergey V. Tikhonov

Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

ROOTS OF POLYNOMIALS OVER DIVISION RINGS

(Communicated by Academician Vyacheslav I. Yanchevskii)

Abstract. In this article, we study the properties of polynomials over division rings. Formulas for finding roots of polynomials which are the products of linear factors are obtained. These formulas generalize the known results for quaternion algebras. As known, if a minimal polynomial of a conjugacy class A in a noncommutative division ring is quadratic, then any polynomial having two roots in A vanishes identically on A . We show that in the case of a conjugacy class with minimal polynomial of larger degree, the situation is completely different. For any conjugacy class with minimal polynomial of degree >2 , we construct a quadratic polynomial with infinitely many roots in this class, but there also are infinitely many elements in this class which are not the roots of this polynomial.

Keywords: division ring, roots of polynomials, quaternion algebra, minimal polynomial

For citation. Goutor A. G., Tikhonov S. V. Roots of polynomials over division rings. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2024, vol. 68, no. 5, pp. 359–364. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2024-68-5-359-364>

А. Г. Гутор, С. В. Тихонов

Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

КОРНИ МНОГОЧЛЕНОВ С КОЭФФИЦИЕНТАМИ В КОЛЬЦАХ С ДЕЛЕНИЕМ

(Представлено академиком В. И. Янчевским)

Аннотация. В работе изучены свойства многочленов с коэффициентами в кольцах с делением. Получены формулы для нахождения корней многочленов, являющихся произведением линейных множителей, обобщающие известные результаты для кватернионных алгебр. Как известно, если минимальный многочлен класса сопряженности A в некоммутативном кольце с делением является квадратичным, то любой многочлен, имеющий два корня в A , обнуляется тождественно на A . В работе показано, что в случае класса сопряженности с минимальным многочленом большей степени ситуация принципиально другая. Для любого класса сопряженности с минимальным многочленом степени >2 построен квадратичный многочлен, имеющий бесконечно много корней в этом классе, при этом в данном классе сопряженности имеется бесконечно много элементов, не являющихся корнями такого многочлена.

Ключевые слова: кольцо с делением, корни многочленов, алгебра кватернионов, минимальный многочлен

Для цитирования. Гутор, А. Г. Корни многочленов с коэффициентами в кольцах с делением / А. Г. Гутор, С. В. Тихонов // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2024. – Т. 68, № 5. – С. 359–364. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2024-68-5-359-364>

Introduction and preliminary results. In this paper, we study polynomials over division rings. Let D be an associative division ring. Let also $D[x]$ denote the polynomial ring in one variable x over D , where x commutes elementwise with D . The coefficients of such polynomials may not commute with elements of the ring. Polynomials in $D[x]$ are added in the obvious way, and multiplied according to the rule

$$(a_n x^n + \cdots + a_0)(b_m x^m + \cdots + b_0) = (c_{m+n} x^{m+n} + \cdots + c_0),$$

where $c_k = \sum_{i+j=k} a_i b_j$. For references on polynomial rings over division rings, see [1, Ch. 5, §16; 2]. The degree of $P(x) \in D[x]$ is defined in the usual way. For a polynomial

$$P(x) = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \cdots + a_1 x + a_0 \in D[x]$$

and an element $a \in D$, we define $P(a)$ to be the element

$$a_n a^n + a_{n-1} a^{n-1} + \cdots + a_1 a + a_0.$$

An element $a \in D$ is said to be a (right) root of $P(x)$ if $P(a) = 0$. The noncommutative form of the Remainder Theorem says that an element $a \in D$ is a root of a nonzero polynomial $P(x)$ iff $x - a$ is a right divisor of $P(x)$ in $D[x]$ (see, e. g., [1, Prop. 16.2]).

For $a \in D$, the set

$$[a] := \{dad^{-1} | d \in D \setminus \{0\}\}$$

will be called the conjugacy class of a . The centralizer of a is defined as

$$Z(a) := \{b \in D | ab = ba\}.$$

Over a field, a polynomial of degree n has at most n distinct roots. Over a division ring this is no longer true, but by Gordon–Motzkin theorem [1, Th. 16.4], a polynomial of degree n in $D[x]$ has roots in at most n conjugacy classes of D , moreover, if $P(x) = (x - a_1) \cdots (x - a_n)$, where $a_1, \dots, a_n \in D$, then any root of $P(x)$ is conjugate to some a_i . Note that from $P(x) = L(x)R(x) \in D[x]$ it does not follow that $P(a) = L(a)R(a)$ (see Proposition below). In particular, if a is a root of $L(x)$, then a is not necessarily a root of $P(x)$.

The problem of finding the roots of a polynomial over a division ring has been investigated in ring theory and applied mathematics. The most studied is the case of polynomials over Hamilton’s quaternion algebra \mathbb{H} . In analogy to field theory, the notion of a (right) algebraically closed division ring R is defined. This is equivalent to saying that every polynomial in $R[x]$ splits completely into a product of linear factors in $R[x]$. By Niven–Jacobson theorem [1, Th. 16.14], the quaternion division algebra over a real-closed field is algebraically closed. Baer’s theorem [1, Th. 16.15] says that noncommutative centrally finite (right) algebraically closed division rings are precisely the division rings of quaternions over real-closed fields. In [3], a formula was found for roots of any quadratic polynomial in $\mathbb{H}[x]$. This formula was generalized to any quaternion algebra in [4] and [5]. In [6], it was shown that the roots of any polynomial in $\mathbb{H}[x]$ are roots of the real companion polynomial. In [7], it was presented an algorithm for finding all roots of a polynomial in $\mathbb{H}[x]$ using the real companion polynomial. In [8], a few of these results were generalized to the case of any central division algebra. Recall that a central division algebra is a division algebra which is finite dimensional over its center. A complete method for finding the roots of all polynomials over an octonion division algebra was described in [9].

In [10], it was presented the following explicit formula describing roots of a product of linear factors in $\mathbb{H}[x]$.

Theorem 1 [10, Th. 4]. *Let $P(x) = (x - q_n) \cdots (x - q_1)$, where $q_1, \dots, q_n \in \mathbb{H}$. If the conjugacy classes $[q_k]$ are distinct, then the polynomial $P(x)$ has exactly n roots ζ_k which are related to the elements q_k as follows:*

$$\zeta_k = \overline{P_k}(q_k) q_k (\overline{P_k}(q_k))^{-1}; k = 1, \dots, n,$$

$$P_k(x) := \begin{cases} 1, & \text{if } k = 1, \\ (x - q_{k-1}) \cdots (x - q_1), & \text{otherwise} \end{cases}$$

and $\overline{P_k}(x)$ is the conjugate polynomial of $P_k(x)$.

In theorem 9 below, we generalize this formula for the case of any division ring. This is the first aim of this paper.

Let F be the center of a division ring D . If a is a root of a polynomial $f(x) \in F[x]$, then any element from the conjugacy class $[a]$ is a root of $f(x)$. The conjugacy class A is called algebraic over F if one (and hence all) of its elements is algebraic over F . If A is algebraic over F , then the minimal polynomial of A is, by definition, the minimal polynomial of any element from A .

In the case of a quadratic minimal polynomial, there is the following

Theorem 2 [1, Lm. 16.17]. *Let D be a division ring with center F , and let A be a conjugacy class of D which has a quadratic minimal polynomial $\lambda(x)$ over F . If $P(x) \in D[x]$ has two roots in A , then $P(x) \in D[x]\lambda(x)$ and $P(x)$ vanishes identically on A .*

This means that a polynomial over a quaternion division algebra may have two different types of roots: isolated and spherical roots. A root q of $P(x)$ is called spherical if q is not central and for every $d \in [q]$ we have $P(d) = 0$. A root q is called isolated if the conjugacy class $[q]$ contains no other root of $P(x)$.

The second aim of this paper is to show that in the case of a conjugacy class with minimal polynomial of bigger degree the situation is completely different. More precisely, we proved the following

Theorem 3. *Let D be a noncommutative division ring with the center F , $a \in D$ an algebraic over F element with minimal polynomial $\lambda(x)$ of degree $n > 2$. Then there exists a quadratic polynomial $P(x) \in D[x]$ such that*

1. $P(x)$ has infinitely many roots in the conjugacy class $[a]$,
2. There are infinitely many elements in $[a]$ which are not roots of $P(x)$,
3. $\lambda(x)$ does not divide $P(x)$.

In the proof of Theorem 3 we will use the following statements.

Theorem 4 [1, Th. 16.6]. *Let D be a division ring with center F and A a conjugacy class of D which is algebraic over F with minimal polynomial $f(x) \in F[x]$. A polynomial $P(x) \in D[x]$ vanishes identically on A iff $P(x) \in D[x]f(x)$.*

Theorem 5 [1, Th. 16.11; 2, Th. 4]. *If a polynomial $P(x) \in D[x]$ has two distinct roots in a conjugacy class of D , then it has infinitely many roots in that class.*

Proposition [1, Pr. 16.3]. *Let D be a division ring and let $P(x) = L(x)R(x) \in D[x]$. Let $d \in D$ be such that $h := R(d) \neq 0$. Then*

$$P(d) = L(hdh^{-1})R(d).$$

In particular, if d is a root of $P(x)$ but not of $R(x)$, then hdh^{-1} is a root of $L(x)$.

Proof of Theorem 3. Let $a \in D$ be an element with minimal polynomial $\lambda(x)$ of degree $n > 2$. Let also $d \in D$ be an element such that d does not commute with a . Let $q = dad^{-1}$ and $b = (q - a)q(q - a)^{-1}$. Then $q \neq a$ and $q \in [a]$. By Proposition, q is a root of the polynomial $P(x) := (x - b)(x - a)$.

Since a is also a root of $P(x)$, then by Theorem 5, $P(x)$ has infinitely many roots in $[a]$. Moreover, since the degree of $\lambda(x)$ is bigger than 2, then $\lambda(x)$ does not divide $P(x)$. Hence by Theorem 4, $P(x)$ does not vanish identically on $[a]$.

Suppose that $tat^{-1} \in [a]$ is not a root of $P(x)$. This means that $tat^{-1} \neq a$ and

$$(tat^{-1} - a)tat^{-1}(tat^{-1} - a)^{-1} \neq b$$

by Proposition.

Note that

$$(tat^{-1} - a)tat^{-1}(tat^{-1} - a)^{-1} = (ta - at)a(ta - at)^{-1}.$$

Let $z \in Z(a)$, $t_1 = t + z$ and $q_1 = t_1at_1^{-1}$. Then

$$\begin{aligned} (q_1 - a)q_1(q_1 - a)^{-1} &= (t_1at_1^{-1} - a)t_1at_1^{-1}(t_1at_1^{-1} - a)^{-1} = \\ &= (t_1a - at_1)a(t_1a - at_1)^{-1} = ((t + z)a - a(t + z))a((t + z)a - a(t + z))^{-1} = (ta - at)a(ta - at)^{-1} \neq b. \end{aligned}$$

Thus q_1 is not a root of $P(x)$ by Proposition.

Now let $z_1 \in Z(a)$, $z_1 \neq z$. Note that the centralizer $Z(a)$ is infinite by [2, Th. 3]. Let also $t_2 = t + z_1$ and $q_2 = t_2 a t_2^{-1}$. Then q_2 is also not a root of $P(x)$.

Assume that $q_1 = q_2$. Then

$$\begin{aligned} (t+z)a(t+z)^{-1} &= (t+z_1)a(t+z_1)^{-1} \Leftrightarrow (t+z_1)^{-1}(t+z)a = a(t+z_1)^{-1}(t+z) \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow (t+z_1)^{-1}(t+z_1+(z-z_1))a = a(t+z_1)^{-1}(t+z_1+(z-z_1)) \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow a + (t+z_1)^{-1}(z-z_1)a = a + a(t+z_1)^{-1}(z-z_1) \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow (t+z_1)^{-1}(z-z_1)a &= a(t+z_1)^{-1}(z-z_1) \Leftrightarrow (t+z_1)^{-1}a(z-z_1) = a(t+z_1)^{-1}(z-z_1) \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow (t+z_1)^{-1}a = a(t+z_1)^{-1} \Leftrightarrow a(t+z_1) = (t+z_1)a \Leftrightarrow at = ta. \end{aligned}$$

This gives a contradiction since t does not commute with a . Then $q_1 \neq q_2$. Hence any $z \in Z(a)$ defines the element $(t+z)a(t+z)^{-1} \in [a]$ which is not a root of $P(x)$ and all such elements are distinct. Since the centralizer $Z(a)$ is infinite, then there are infinitely many elements in $[a]$ which are not roots of $P(x)$. \square

R e m a r k 1. In the notation of the proof of Theorem 3, let

$$b_1 = (tat^{-1} - a)ta^{-1}(tat^{-1} - a)^{-1}.$$

The polynomials $(x-b)(x-a)$ and $(x-b_1)(x-a)$ have infinitely many roots in the conjugacy class $[a]$, but a is the unique common root of these polynomials.

Roots of polynomials. It seems to us that the following lemma may be a known result, but we have not found an exact reference. For the reader's convenience, we provide a proof here.

L e m m a. Let D be a division ring. Let also

$$P(x) = (x-d_n)\dots(x-d_1),$$

where $d_1, \dots, d_n \in D$. If the conjugacy classes $[d_k]$ are distinct, then the polynomial $P(x)$ has exactly n roots and any root of $P(x)$ is conjugate to some d_i .

P r o o f. By Gordon–Motzkin theorem [1, Th. 16.4], the roots of $P(x)$ lie in n conjugacy classes of D and any root of $P(x)$ is conjugate to some d_i . Let $d \in D$ be a root of $P(x)$, then $P(x) = L(x)(x-d)$ for some $L(x) \in D[x]$. By Proposition, all roots of $P(x)$ different from d are conjugate to roots of $L(x)$. Since the conjugacy classes $[d_k]$ are distinct and $\deg(L(x)) = n-1$, then by Gordon–Motzkin theorem, $L(x)$ has no roots in $[d]$. Thus $P(x)$ has only one root in each conjugacy class. \square

T h e o r e m 6. Let D be a division ring with center F . Let also

$$P(x) = (x-d_n)\dots(x-d_1),$$

where $d_1, \dots, d_n \in D$. Assume that d_1, \dots, d_{n-1} are algebraic over F . Let also $f_i(x)$ be the minimal polynomial of d_i , $i = 1, \dots, n-1$. If the conjugacy classes $[d_k]$ are distinct, then the polynomial $P(x)$ has exactly n zeros ζ_k which are related to the elements d_k as follows:

$$\begin{aligned} \zeta_k &= P_k(d_k)d_k(P_k(d_k))^{-1}; \quad k = 1, \dots, n, \\ P_k(x) &:= \begin{cases} 1, & \text{if } k = 1, \\ S_1(x)\dots S_{k-1}(x), & \text{otherwise,} \end{cases} \end{aligned}$$

where $S_i(x) \in D[x]$ is such that $f_i(x) = S_i(x)(x-d_i)$, $i = 1, \dots, n-1$.

P r o o f. Since $S_i(x)$ has coefficients in the field $F(d_i)$, then

$$f_i(x) = S_i(x)(x-d_i) = (x-d_i)S_i(x)$$

for $i = 1, \dots, n-1$. Note that

$$P(x)P_k(x) = (x-d_n)\dots(x-d_1)S_1(x)\dots S_{k-1}(x) = (x-d_n)\dots(x-d_k)f_{k-1}(x)\dots f_1(x).$$

Since $f_{k-1}(x)\dots f_1(x) \in F[x]$, then d_k is a root of the polynomial $P(x)P_k(x)$. Note that for $i = 1, \dots, k-1$, $d_k \notin [d_i]$, so d_k is not a root of $f_i(x)$ by Dickson's Theorem [1, Th. 16.8]. Hence d_k is not a root of $f_{k-1}(x)\dots f_1(x)$. Then d_k is not a root of $P_k(x)$. Indeed,

$$(x - d_{k-1}) \dots (x - d_1) P_k(x) = (x - d_{k-1}) \dots (x - d_1) S_1(x) \dots S_{k-1}(x) = f_{k-1}(x) \dots f_1(x)$$

and if d_k is a root of $P_k(x)$, then d_k is a root of $f_{k-1}(x) \dots f_1(x)$.

Hence by Proposition, $P_k(d_k) d_k (P_k(d_k))^{-1}$ is a root of $P(x)$ for $k = 1, \dots, n$. By Lemma, $P(x)$ has no other roots. \square

In the notation of Theorem 6, we have the following

C o r o l l a r y. *Let D be a division ring with center F , $d_1, d_2 \in D$ such that the conjugacy classes $[d_1]$ and $[d_2]$ are distinct. Assume that d_1 is algebraic over F . Let also $f(x)$ be the minimal polynomial of d_1 and $S(x) \in D[x]$ such that $f(x) = S(x)(x - d_1)$. Then*

$$(x - d_2)(x - d_1) = (x - d)(x - S(d_2)d_2(S(d_2))^{-1}),$$

where $d = (d_1 - S(d_2)d_2(S(d_2))^{-1})d_1(d_1 - S(d_2)d_2(S(d_2))^{-1})^{-1}$.

P r o o f. Let $P(x) := (x - d_2)(x - d_1)$. By Theorem 6, $d_3 := S(d_2)d_2(S(d_2))^{-1}$ is a root of $P(x)$. Then $x - d_3$ is a right divisor of $P(x)$ and $P(x) = (x - d)(x - d_3)$ for some $d \in D$. Since d_1 is a root of $P(x)$ and $d_1 \neq d_3$, then by Proposition,

$$d = (d_1 - d_3)d_1(d_1 - d_3)^{-1} = (d_1 - S(d_2)d_2(S(d_2))^{-1})d_1(d_1 - S(d_2)d_2(S(d_2))^{-1})^{-1}. \square$$

R e m a r k 2. *The formula from the previous corollary allows to change the order of factors in products of monic linear polynomials. This formula generalizes formulas for Hamilton’s quaternion algebra from [11, Lm. 1] (see also [10, Th. 7]).*

E x a m p l e. Let F be a field, $\text{char}(F) \neq 2$. Let also Q be a quaternion division algebra over F .

Assume that $d_1, d_2 \in Q$, $[d_1] \neq [d_2]$. If $d_1 \notin F$ then the minimal polynomial of d_1 is $(x - \overline{d_1})(x - d_1)$, where $\overline{d_1}$ is the conjugate of d_1 . Hence in the notation of Corollary, $S(x) = x - \overline{d_1}$. Then

$$S(d_2)d_2(S(d_2))^{-1} = (d_2 - \overline{d_1})d_2(d_2 - \overline{d_1})^{-1}.$$

Simple computations show that

$$(d_1 - S(d_2)d_2(S(d_2))^{-1})d_1(d_1 - S(d_2)d_2(S(d_2))^{-1})^{-1} = (d_2 - \overline{d_1})d_1(d_2 - \overline{d_1})^{-1}.$$

Thus

$$(x - d_2)(x - d_1) = (x - hd_1h^{-1})(x - hd_2h^{-1}),$$

where $h = d_2 - \overline{d_1}$ (compare with the formula from [11, Lm. 1]).

References

1. Lam T. Y. *A first course in noncommutative rings. Graduate Texts in Mathematics 131*. New York, Springer-Verlag, 2001. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8616-0>
2. Gordon B., Motzkin T. S. On the zeros of polynomials over division rings. *Transactions of the American Mathematical Society*, 1965, vol. 116, pp. 218–226. <https://doi.org/10.1090/S0002-9947-1965-0195853-2>
3. Huang L., So W. Quadratic formulas for quaternions. *Applied Mathematics Letters*, 2002, vol. 15, no. 5, pp. 533–540. [https://doi.org/10.1016/s0893-9659\(02\)80003-9](https://doi.org/10.1016/s0893-9659(02)80003-9)
4. Abrate M. Quadratic formulas for generalized quaternions. *Journal of Algebra and its Applications*, 2009, vol. 8, no. 3, pp. 289–306. <https://doi.org/10.1142/s0219498809003308>
5. Chapman A. Quaternion quadratic equations in characteristic 2. *Journal of Algebra and its Applications*, 2015, vol. 14, no. 3, art. 1550033. <https://doi.org/10.1142/s0219498815500334>
6. Serodio R., Pereira E., Vitoria J. Computing the zeros of quaternion polynomials. *Computers and Mathematics with Applications*, 2001, vol. 42, no. 8–9, pp. 1229–1237. [https://doi.org/10.1016/s0898-1221\(01\)00235-8](https://doi.org/10.1016/s0898-1221(01)00235-8)
7. Janovska D., Opfer G. A note on the computation of all zeros of simple quaternionic polynomials. *SIAM Journal of Numerical Analysis*, 2010, vol. 48, no. 1, pp. 244–256. <https://doi.org/10.1137/090748871>
8. Chapman A., Machen C. Standard polynomial equations over division algebras. *Advances in Applied Clifford Algebras*, 2017, vol. 27, pp. 1065–1072. <https://doi.org/10.1007/s00006-016-0740-4>
9. Chapman A. Polynomial equations over octonion algebras. *Journal of Algebra and its Applications*, 2020, vol. 19, no. 6, art. 2050102. <https://doi.org/10.1142/s0219498820501029>
10. Falcão M. I., Miranda F., Severino R., Soares M. J. Mathematica tools for quaternionic polynomials. *Computational science and its applications. ICCSA 2017*. 2017, part II, pp. 394–408. https://doi.org/10.1007/978-3-319-62395-5_27
11. Serodio R., Siu L.-S. Zeros of quaternion polynomials. *Applied Mathematics Letters*, 2001, vol. 14, no. 2, pp. 237–239. [https://doi.org/10.1016/s0893-9659\(00\)00142-7](https://doi.org/10.1016/s0893-9659(00)00142-7)

Information about the authors

Goutor Alina G. – Senior Lecturer. Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: goutor@bsu.by.

Tikhonov Sergey V. – Ph. D. (Physics and Mathematics), Head of the Department. Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: tikhonovsv@bsu.by. ORCID: 0000-0002-2597-7964.

Информация об авторах

Гутор Алина Геннадьевна – ст. преподаватель. Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: goutor@bsu.by.

Тихонов Сергей Викторович – канд. физ.-мат. наук, заведующий кафедрой. Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: tikhonovsv@bsu.by. ORCID: 0000-0002-2597-7964.

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

ФИЗИКА
PHYSICS

УДК 577.322.7+577.338+004.94
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2024-68-5-365-372>

Поступило в редакцию 16.08.2024
Received 16.08.2024

**У. В. Потапова¹, С. И. Феранчук, А. В. Батяновский²,
Д. С. Матусков¹, И. Д. Феранчук³**

¹Белорусский государственный технологический университет, Минск, Республика Беларусь

²Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь

³Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

**КВАНТОВАЯ ЗАПУТАННОСТЬ В ПАРЕ ИОНОВ ЦИНКА
РНК-ЗАВИСИМОЙ РНК-ПОЛИМЕРАЗЫ ФЛАВИВИРУСОВ И ЕЕ РОЛЬ
В РЕАКЦИИ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ**

(Представлено членом-корреспондентом А. В. Тузиковым)

Аннотация. Белок полимеразы флавивирусов в процессе реакции полимеризации претерпевает структурные изменения. Белок содержит два атома цинка, каждый из которых координируется четырьмя аминокислотами белка. Рассмотрена возможность квантового перехода в атомах цинка. Показано, что в силу квантовой запутанности этот переход происходит совместно в обоих атомах. С помощью моделирования молекулярной динамики показано, что малые возмущения структуры, связанные с совместным переходом атомов цинка, приводят к изменениям третичной структуры полимеразы. Обсуждается возможность обозначенного явления в других цинксодержащих белках.

Ключевые слова: полимеразы флавивирусов, цинксодержащие белки, структурная роль цинка, квантовая запутанность, молекулярная динамика

Для цитирования. Квантовая запутанность в паре ионов цинка РНК-зависимой РНК-полимеразы флавивирусов и ее роль в реакции полимеризации / У. В. Потапова [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2024. – Т. 68, № 5. – С. 365–372. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2024-68-5-365-372>

**Ulyana V. Potapova¹, Sergey I. Feranchuk, Alexander V. Batyanovskii²,
Dmitry S. Matuskov¹, Ilya D. Feranchuk³**

¹Belarusian State Technological University, Minsk, Republic of Belarus

²United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

³Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

**QUANTUM ENTANGLE IN A ZINC ION PAIR OF RNA-DEPENDENT RNA POLYMERASE OF
FLAVIVIRUSES AND ITS ROLE IN THE POLYMERIZATION REACTION**

(Communicated by Corresponding Member Aleksandr V. Tuzikov)

Abstract. The flavivirus polymerase protein undergoes structural changes during the polymerization reaction. The protein contains two zinc atoms, each of which is coordinated by four amino acids of the protein. The possibility of a quantum transition in zinc atoms is considered. It is shown that due to quantum entanglement this transition occurs jointly in both atoms. Using molecular dynamics modeling, it is shown that small perturbations of the structure associated with the joint transition of zinc atoms lead to structural changes in the polymerase. The prevalence of this phenomenon on other zinc-containing proteins is discussed.

Keywords: flavivirus polymerase, zinc proteins, structural role of zinc, quantum entanglement, molecular dynamics

For citation. Potapova U. V., Feranchuk S. I., Batyanovskii A. V., Matuskov D. S., Feranchuk I. D. Quantum entangle in a zinc ion pair of RNA-dependent RNA polymerase of flaviviruses and its role in the polymerization reaction. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2024, vol. 68, no. 5, pp. 365–372 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2024-68-5-365-372>

Введение. В последнее время изучение явлений, связанных с квантовыми процессами в биологических процессах, – квантовая биология, привлекает большое внимание [1]. В настоящей работе показано, что квантовые эффекты могут влиять на стабильность и конформационные изменения белковых структур.

Биологические молекулы состоят, как из кирпичиков, из повторяющихся органических соединений, в белках это 20 типов аминокислот. Помимо этого, многие белки включают как неотъемлемую часть атомы тяжелых металлов, соединенных с аминокислотами координационными связями. Типы и положение атомов металлов уникальны для каждого белка. В силу богатства своего энергетического спектра и возможностей квантовых переходов на близкорасположенных уровнях, атомы металлов существенно расширяют спектр химических активностей в функциях белков.

Цинк занимает второе место после железа среди переходных металлов по участию в химических, структурных и регуляторных процессах живых систем [2]. Структурная роль цинка обусловлена его способностью переходить в четырехвалентное состояние, устанавливая на внешней орбитали четыре электрона в состоянии sp^3 -гибридизации.

Структурная роль цинка может состоять не только в поддержании стабильности белковой структуры, но и в модулировании ее перестроения, что показано на примере белка полимеразы флавивирусов (RdRp). Этот вирусный белок, достаточно большой по размеру (более 500 остатков), служит в жизненном цикле вируса для копирования вирусной РНК.

Атомы цинка достаточно часто встречаются в белках, причем в большинстве случаев цинк координируется четырьмя атомами белка [3–6]. По сравнению с цинком в неорганических соединениях, в четырехвалентном цинке два электрона переходят на 4р-орбиталь с 3d-орбитали, освобождая там две вакансии (рис. 1).

Про цинк в белках в этих случаях нельзя сказать, что он напрямую участвует в катализе каких-либо реакций. Роль цинка называют структурной. Четыре координационные связи служат для поддержания стабильности структуры белковой молекулы. Можно допустить возможность квантового перехода с 4р-орбитали на 3d-орбиталь, когда атом теряет одну из координационных связей.

В свободном атоме цинка конфигурация с четырьмя валентностями в состоянии sp^3 -гибридизации энергетически менее выгодна, чем состояние с двумя валентностями. Энергетическую щель можно примерно оценить переходом с длиной волны порядка 60 нм [7]. В окружении белковой глобулы эту величину оценить сложнее, можно предположить, что переход находится в диапазоне видимого света – теплового излучения.

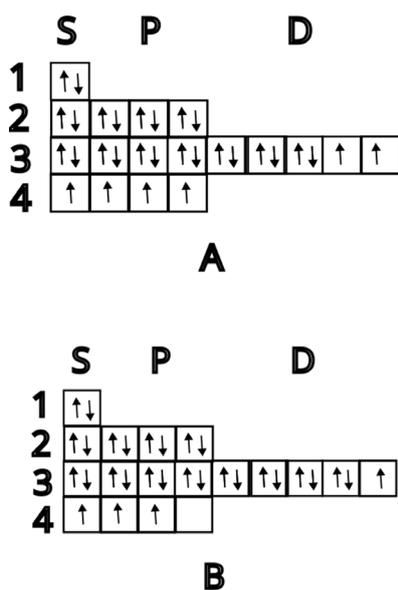


Рис. 1. Электронная конфигурация атома цинка в белке

Fig. 1. Electronic configuration of a zinc atom in a protein

Конформационные переходы полимеразы. RdRp, как домен, входящий в состав многофункционального белка NS5 (неструктурный белок 5), включает в себя два иона цинка и один ион магния. Роль RdRp – полимеризация цепи вирусной рибонуклеиновой кислоты (РНК). Подобно кисти руки, белок охватывает матричную цепь РНК и катализирует присоединение по одному из остатков строящейся цепи. Ион магния, расположенный непосредственно в активном центре полимеразы, осуществляет перенос электрона в процессе катализа присоединения остатка РНК к новой цепи. Ионы цинка расположены вне активного центра, на двух сторонах белка.

Кристаллическая структура домена RdRp была получена раньше, чем модель полноразмерного белка NS5 [3–5]. Вирус японского энцефалита (JEV) – организм, для которого была построена структура полноразмерного белка [6]. На этот момент было известно уже много структур домена полимеразы. В банке данных белковых структур они обозначены четырехбуквенным кодом.

Присутствие атомов цинка в полимеразе было выяснено на основании данных кристаллографии. Точные значения длин координационных связей каждого из атомов цинка варьируют от структуры к структуре (таблица).

Длины связей, в ангстремах, для двух атомов цинка и четырех координирующих остатков
Bond lengths, in angstroms, for two zinc atoms and four coordinating residues

PDB-код структуры PDB code of the structure	Связь между цинком и остатком The relationship between zinc and residue							
	1-1	1-2	1-3	1-4	2-1	2-2	2-3	2-4
2J7w	2,29 Asp1	1,99 His2	2,36 Cys3	2,14 Cys4	1,94 His1	2,02 His2	2,30 Cys3	2,12 Cys4
4k6m	1,99 Asp1	1,94 His2	2,21 Cys3	2,19 Cys4	2,22 His1	–	2,52 Cys3	2,38 Cys4
4hdg	2,01 Asp1	2,02 His2	2,12 Cys3	2,13 Cys4	2,13 His1	–	2,09 Cys3	1,98 Cys4
4v0r	2,26 Asp1	2,11 His2	2,46 Cys3	2,20 Cys4	2,38 His1	–	2,44 Cys3	2,42 Cys4

Согласованный квантовый переход в атомах цинка. Рассмотрим возможность квантового перехода в каждом из атомов цинка на свободные вакансии на d-орбитали. Упростим задачу до модельной, когда каждый из атомов цинка представлен двухуровневой системой. Длина волны излучения при квантовом переходе в атоме цинка много больше размеров белка. Мы предполагаем, что в силу квантовой запутанности есть связь между квантовыми переходами обоих атомов и синхронное перестроение длин связей в обоих атомах ведет к перестроению структуры всего белка.

В принятом предположении взаимодействие двух атомов цинка с электромагнитным полем описывается модельным гамильтонианом Тэвиса–Каммингса [8] (используется система единиц с $\hbar = c = 1$)

$$H = \omega [1/2(\sigma_3^1 + \sigma_3^2) + f(\sigma_1^1 + \sigma_1^2)(a + a^+) + a^+ a] - i\gamma/2,$$

где $\sigma_i^{1,2}$ – матрицы Паули, действующие в пространстве состояний первого и второго атомов; a, a^+ – операторы рождения и уничтожения квантов поля; f – безразмерная константа связи атомов и поля; $f = e_0 |d_{12}| \sqrt{\frac{2\pi}{\omega V}}$; e_0 – заряд электрона; d_{12} – дипольный матричный элемент перехода атома между конфигурациями; $V = l^3$ – область локализации резонансного электромагнитного поля, которая определяется объемом молекулы протеина; $\gamma = \frac{2}{3} e_0^2 \omega^3 |d_{12}|^2$ – радиационная ширина линии спонтанного перехода между конфигурациями; ω – частота резонансного квантового поля.

Спектр нижележащих состояний гамильтониана при малых f , согласно [9], определяется основным состоянием и двумя возбужденными состояниями, которые являются перепутанными (симметричным и антисимметричным)

$$\begin{aligned} \Psi_0 &= \chi_{\downarrow}^1 \chi_{\downarrow}^2 |0\rangle, E_0 \approx (-1 + 4f^2)\omega, \\ \Psi_{\pm} &= \frac{1}{2}(\chi_{\downarrow}^1 \chi_{\uparrow}^2 \pm \chi_{\uparrow}^1 \chi_{\downarrow}^2) |0\rangle, E_{\pm} \approx -4f^2\omega, E_{-} = 0, \end{aligned}$$

где спинор $\chi_{\downarrow}^{1,2}$ соответствует основному состоянию атомов; $\chi_{\uparrow}^{1,2}$ – возбужденному состоянию.

Перепутанность приводит к коррелированной эволюции обоих атомов. Действительно, предположим, что в момент времени $t = 0$ в результате тепловой флуктуации или внешнего воздействия первый атом перешел в состояние с конфигурацией В (рис. 1). Дальнейшая эволюция системы определяется разложением по стационарным состояниям

$$\Psi(t) = C_1 \psi_+ e^{(-iE_+ t)} + C_2 \psi_- e^{(-iE_- t)}.$$

Из начального условия $\Psi(0) = \psi_-$ и условия нормировки находим $C_1 = C_2 = 1/\sqrt{2}$, эволюция определяется уравнением $\Psi(t) = e^{(-\gamma t)} / \sqrt{2} (\psi_+ e^{(-i4f^2 \omega t)} + \psi_-)$. Вычислим вероятности обнаружить первый и второй атом цинка в 3-валентном состоянии

$$P_1^\uparrow = e^{-\gamma t} \cos^2(2f^2 \omega t), \quad P_2^\uparrow = e^{-\gamma t} \sin^2(2f^2 \omega t).$$

Используя определение f , находим, что за время жизни $\tau = 1/\gamma$ атомов в возбужденных состояниях эти вероятности равны

$$P_1^\uparrow = 1/e \cos^2(Q), \quad P_2^\uparrow = 1/e \sin^2(Q), \quad Q \approx (\lambda/l)^3 \gg 1,$$

где λ – длина волны излучения при переходе иона цинка в невозбужденное состояние.

В пренебрежении быстро осциллирующими слагаемыми их можно считать одинаковыми и равными $1/(2e)$. Таким образом, квантовый переход одного атома цинка индуцирует переход во втором атоме.

Расчет конформационных переходов полимеразы. Молекула полимеразы сходна с кистью руки, в центр входит шаблон РНК и осуществляется синтез второй цепи. В процессе полимеризации молекула претерпевает циклические конформационные переходы, когда кисть руки слегка приоткрывается. Допустив, что квантовый переход в атомах цинка модулирует этот конформационный переход, напрямую обнаружить его в молекулярно-динамическом эксперименте затруднительно. Для выявления такого механизма был проведен вычислительный эксперимент, где жесткость длин связей в атомах цинка была выставлена форсировано высокой.

При моделировании белка методом молекулярной динамики с помощью пакета Amber [10] длины связей в каждой из аминокислот задаются приложенным к пакету набором параметров, называемых «силовым полем». Помимо длин связей, силовое поле включает величины плоских и двугранных углов, и константы упругости для длин связей и углов.

Представленные ниже результаты получены на основе молекулярно-динамического эксперимента по структуре полноразмерного белка 4v0r. В эксперимент для расчетов включены атомы

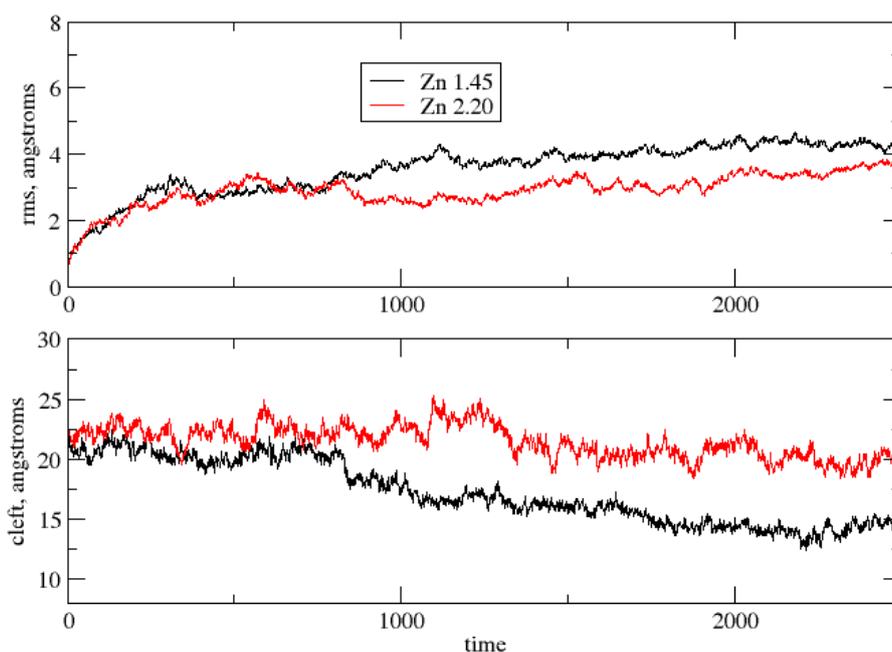


Рис. 2. Изменения среднеквадратичного отклонения и размера щели в зависимости от времени моделирования

Fig. 2. Changes in standard deviation and slot size as a function of simulation time

магния и цинка. Параметры силового поля для атомов металлов требовалось явно задать при проведении эксперимента. Было проведено две серии расчетов. В одной серии длины всех четырех координационных связей были 2,2 Å («мягкие»), в другой – 1,45 Å («жесткие»).

Траектории молекулярной динамики показали относительную стабильность построенных структур, но форма полимеразы изменялась для структуры с длиной 1,45 Å («жесткая» длина связи). А именно, размер щели (cleft) для входа шаблона РНК сужался на протяжении времени динамики (рис. 2).

Изменение формы полимеразы проиллюстрировано на рис. 3.

Проведенный вычислительный эксперимент показал, что места связывания ионов цинка расположены так, что ионы цинка не только способствуют стабилизации структуры, но и выбору ее конформационного состояния в зависимости от параметров силового поля.

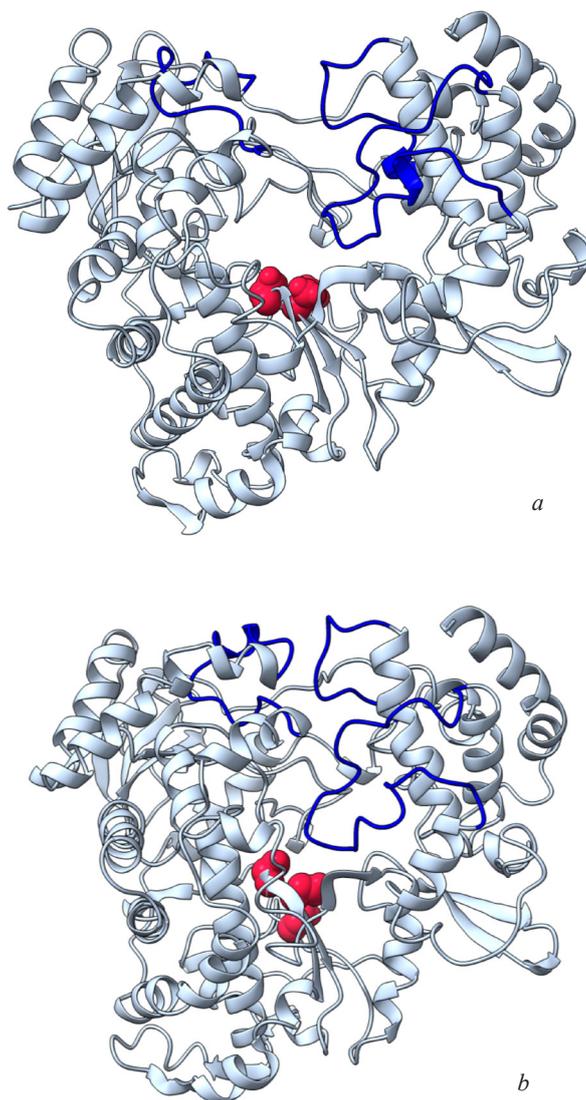


Рис. 3. Структура белка NS5 JEV после проведения 20 нс моделирования с различающимися параметрами силового поля для ионов цинка. Красным показана каталитическая триада репликации РНК, синим – вход в тоннель шаблона РНК: *a* – состояние, в котором тоннель открыт (большие длины координационных связей цинка); *b* – состояние, в котором тоннель закрыт (малые длины координационных связей цинка)

Fig. 3. Structure of the NS5 JEV protein after 20 ns simulations with varying force field parameters for zinc ions. The catalytic triad of RNA replication is shown in red, the entrance to the RNA template tunnel is shown in blue: *a* – the state in which the tunnel is open (large lengths of zinc coordination bonds); *b* – the state in which the tunnel is closed (small lengths of zinc coordination bonds)

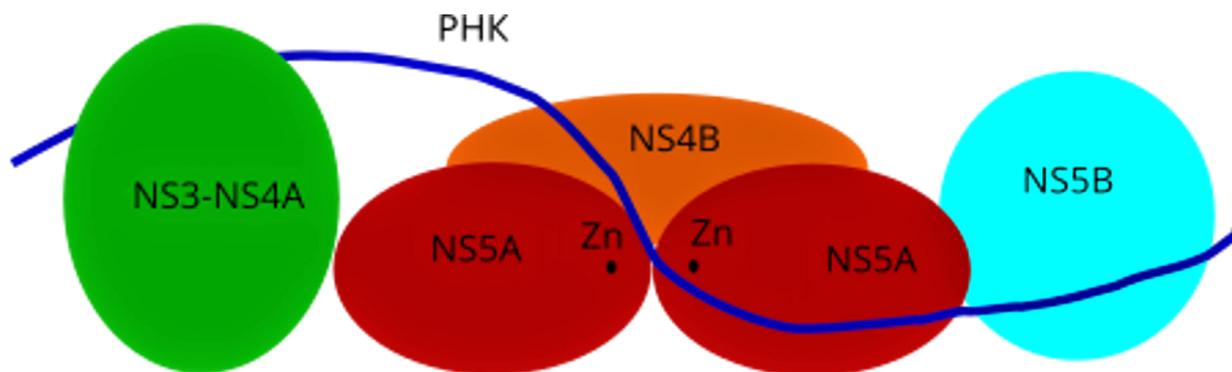


Рис. 4. Схема репликационного комплекса вируса гепатита С

Fig. 4. Schema of the hepatitis C virus replication complex

Обобщение роли цинка. При обсуждении полученных в работе результатов следует ответить на два вопроса. Первый – можно ли ожидать влияния ионов цинка в перестроении структуры других белков? Второй – что обуславливает квантовые переходы в атоме цинка?

Ответ на первый вопрос положительный. В частности, если предположить необходимость перестроения ионов цинка в процессе полимеризации РНК, в качестве еще одного примера можно рассмотреть репликационный комплекс вируса гепатита С, родственного флавивирусам [11].

В этой структуре сама полимераза NS4B не связывает цинк, но по одному иону цинка находится в сопряженных белках NS5A (рис. 4). Перестроение ионов цинка, как можно допустить, также способствует конформационному изменению кармана связывания РНК, хотя и через другой механизм.

Среди многообразия других координирующих цинк белков выберем для иллюстрации класс транскрипционных факторов «zinc-finger», в изобилии присутствующих в геноме эукариот [12]. Ответим на вопрос, какие конформационные изменения мог бы модулировать находящийся в них ион цинка? Дело в том, что скорость функционирования транскрипционных факторов, чья задача состоит в связывании с цепью ДНК в нужном сайте, так велика, что для объяснения следует допустить, что у транскрипционных факторов есть две моды структуры – мода поиска, грубое приближение к сайту связывания, и мода распознавания, когда фермент узнает нужные остатки ДНК с должной точностью [13]. Перестроение между этими модами и может модулировать ион цинка.

Ответить на второй вопрос, а именно, что является причиной квантового перехода в атоме цинка, сложнее. Энергия перехода сравнима с энергией теплового движения молекул, поэтому переход может происходить спонтанно по причине смещений координирующих атомов белка. Но наличие двух атомов цинка в полимеразе флавивирусов, а также двух атомов цинка в транскрипционном комплексе вируса гепатита С, дает основания предположить наличие координации в переходе в нескольких атомах цинка. Координация перехода выше объяснена эффектом квантовой запутанности орбиталей атомов, осуществленной посредством электромагнитного поля.

Утверждение о проявлении эффекта квантовой запутанности при перестройке структуры можно подтвердить спектроскопическим исследованием изменения состояний атомов цинка. Подтверждение этой гипотезы предоставляет механизм, позволяющий прояснить роль квантовых эффектов в биологических системах в масштабах, намного превышающих размеры атомов.

Список использованных источников

1. Quantum biology / N. Lambert [et al.] // *Nature Phys.* – 2013. – Vol. 9. – P. 10–18. <https://doi.org/10.1038/nphys2474>
2. Гармаза, Ю. М. Цинк в живом организме: биологическая роль и механизмы действия / Ю. М. Гармаза, Е. И. Слободянина. – Минск, 2021. – 189 с.
3. Crystal structure of the RNA polymerase domain of the West Nile virus non-structural protein 5 / H. Malet [et al.] // *J. Biol. Chem.* – 2007. – Vol. 282, N 14. – P. 10678–10689. <https://doi.org/10.1074/jbc.m607273200>

4. Crystal structure of the dengue virus RNA-dependent RNA polymerase catalytic domain at 1.85-angstrom resolution / T. L. Yap [et al.] // *J. Virol.* – 2007. – Vol. 81, N 9. – P. 4753–4765. <https://doi.org/10.1128/jvi.02283-06>
5. Crystal structure of the Dengue virus NS5 protein reveals a novel inter-domain interface essential for protein flexibility and virus replication / Y. Zhao [et al.] // *PLoS Pathog.* – 2015. – Vol. 11, N 3. – Art. e1004682. <https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1004682>
6. Lu, G. Crystal Structure of the full-length Japanese encephalitis virus NS5 reveals a conserved methyltransferase-polymerase interface / G. Lu, P. Gong // *PLoS Pathog.* – 2013. – Vol. 9, N 8. – Art. e1003549. <https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1003549>
7. Analytic model of a multi-electron atom / O. D. Skoromnik [et al.] // *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* – 2017. – Vol. 50. – Art. 245007. <https://doi.org/10.1088/1361-6455/aa92e6>
8. Tavis, M. Approximate Solutions for an *N*-Molecule-Radiation-Field Hamiltonian / M. Tavis, F. W. Cummings // *Phys. Rev.* – 1969. – Vol. 188, N 2. – P. 692–695. <https://doi.org/10.1103/physrev.188.692>
9. Radiation-induced interaction potential of two qubits strongly coupled with a quantized electromagnetic field / I. D. Feranchuk [et al.] // *Phys. Rev. A.* – 2020. – Vol. 102, N 4. – Art. 043702. <https://doi.org/10.1103/physreva.102.043702>
10. The Amber biomolecular simulation programs / D. A. Case [et al.] // *J. Comput. Chem.* – 2005. – Vol. 26, N 16. – P. 1668–1688. <https://doi.org/10.1002/jcc.20290>
11. Gong, P. Structural basis for active site closure by the poliovirus RNA-dependent RNA polymerase / P. Gong, O. B. Peersen // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* – 2010. – Vol. 107, N 52. – P. 22505–22510. <https://doi.org/10.1073/pnas.1007626107>
12. Klug, A. Zinc fingers: a novel protein fold for nucleic acid recognition / A. Klug, D. Rhodes // *Cold Spring Harb. Symp. Quant. Biol.* – 1987. – Vol. 52. – P. 473–482. <https://doi.org/10.1101/sqb.1987.052.01.054>
13. Iwahara, J. Speed-stability paradox in DNAscanning by zinc-finger proteins / J. Iwahara, Y. Levy // *Transcription.* – 2013. – Vol. 4, N 2. – P. 58–61. <https://doi.org/10.4161/trns.23584>

References

1. Lambert N., Chen Y. N., Cheng Y. C., Li C. M., Chen G. Y., Nori F. Quantum biology. *Nature Physics*, 2013, vol. 9, pp. 10–18. <https://doi.org/10.1038/nphys2474>
2. Garmaza Yu. M., Slobozhanina E. I. *Zinc in the living organism: biological role and mechanisms of action*. Minsk, 2021. 189 p. (in Russian).
3. Malet H., Egloff M. P., Selisko B., Butcher R. E., Wright P. J., Roberts M., Gruez A., Sulzenbacher G., Vonnrhein C., Bricogne G., Mackenzie J. M., Khromykh A. A., Davidson A. D., Canard B. Crystal structure of the RNA polymerase domain of the West Nile virus non-structural protein 5. *Journal of Biological Chemistry*, 2007, vol. 282, no. 14, pp. 10678–10689. <https://doi.org/10.1074/jbc.m607273200>
4. Yap T. L., Xu T., Chen Y. L., Malet H., Egloff M. P., Canard B., Vasudevan S. G., Lescar J. Crystal structure of the dengue virus RNA-dependent RNA polymerase catalytic domain at 1.85-angstrom resolution. *Journal of Virology*, 2007, vol. 81, no. 9, pp. 4753–4765. <https://doi.org/10.1128/jvi.02283-06>
5. Zhao Y., Soh T. S., Zheng J., Chan K. W., Phoo W. W., Lee C. C., Tay M. Y., Swaminathan K., Cornvik T. C., Lim S. P., Shi P. Y., Lescar J., Vasudevan S. G., Luo D. A crystal structure of the Dengue virus NS5 protein reveals a novel inter-domain interface essential for protein flexibility and virus replication. *PLoS Pathogens*, 2015, vol. 11, no. 3, art. e1004682. <https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1004682>
6. Lu G., Gong P. Crystal Structure of the full-length Japanese encephalitis virus NS5 reveals a conserved methyltransferase-polymerase interface. *PLoS Pathogens*, 2013, vol. 9, no. 8, art. e1003549. <https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1003549>
7. Skoromnik O. D., Feranchuk I. D., Leonau A. U., Keitel C. H. Analytic model of a multi-electron atom. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 2017, vol. 50, art. 245007. <https://doi.org/10.1088/1361-6455/aa92e6>
8. Tavis M., Cummings F. W. Approximate Solutions for an *N*-Molecule-Radiation-Field Hamiltonian. *Physical Review*, 1969, vol. 188, no. 2, pp. 692–695. <https://doi.org/10.1103/physrev.188.692>
9. Feranchuk I. D., San N. Q., Leonau A. U., Skoromnik O. D. Radiation-induced interaction potential of two qubits strongly coupled with a quantized electromagnetic field. *Physical Review A*, 2020, vol. 102, no. 4, art. 043702. <https://doi.org/10.1103/physreva.102.043702>
10. Case D. A., Cheatham T. E., Darden T., Gohlke H., Luo R., Merz K. M. Jr., Onufriev A., Simmerling C., Wang B., Woods R. J. The Amber biomolecular simulation programs. *Journal of Computational Chemistry*, 2005, vol. 26, no. 16, pp. 1668–1688. <https://doi.org/10.1002/jcc.20290>
11. Gong P., Peersen O. B. Structural basis for active site closure by the poliovirus RNA-dependent RNA polymerase. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 2010, vol. 107, no. 52, pp. 22505–22510. <https://doi.org/10.1073/pnas.1007626107>
12. Klug A., Rhodes D. Zinc fingers: a novel protein fold for nucleic acid recognition. *Cold Spring Harbor Symposia on Quantative Biology*, 1987, vol. 52, pp. 473–482. <https://doi.org/10.1101/sqb.1987.052.01.054>
13. Iwahara J., Levy Y. Speed-stability paradox in DNA-scanning by zinc-finger proteins. *Transcription*, 2013, vol. 4, no. 2, pp. 58–61. <https://doi.org/10.4161/trns.23584>

Информация об авторах

Потапова Ульяна Валерьевна – ассистент. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, Минск, Республика Беларусь). E-mail: shuana1983@yandex.ru.

Феранчук Сергей Ильич – канд. физ.-мат. наук. E-mail: feranchuk@gmail.com.

Батяновский Александр Валерьевич – канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник. Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси (ул. Сурганова, 6, 220012, Минск, Республика Беларусь). E-mail: alexandersn@newman.bas-net.by.

Матусков Дмитрий Сергеевич – студент. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, Минск, Республика Беларусь). E-mail: dimamatuscob@gmail.com.

Феранчук Илья Давыдович – д-р физ.-мат. наук, профессор. Белорусский государственный университет (пр. Независимости 4, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: iferanchuk@gmail.com.

Information about the authors

Potapova Ulyana V. – Assistant. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlov Str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: shuana1983@yandex.ru.

Feranchuk Sergey I. – Ph. D. (Physics and Mathematics). E-mail: feranchuk@gmail.com.

Batyanovskii Alexander V. – Ph. D. (Physics and Mathematics), Senior Researcher. United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus (6, Sarganov Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: alexandersn@newman.bas-net.by.

Matuskov Dmitry S. – Student. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlov Str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dimamatuscob@gmail.com.

Feranchuk Ilya D. – D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor. Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: iferanchuk@gmail.com.

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

ХИМИЯ
CHEMISTRY

УДК 546.03.05+535-15
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2024-68-5-373-380>

Поступило в редакцию 07.05.2024
Received 07.05.2024

Н. Н. Костюк¹, Т. А. Дик¹, академик А. Р. Цыганов²

¹Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

²Белорусский государственный технологический университет, Минск, Республика Беларусь

**АНАЛИЗ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФТОРСОДЕРЖАЩИХ
β-ДИКЕТОНАТОВ ВАНАДИЯ(III)**

Аннотация. Методом электрохимического синтеза получены трис-трифторацетилацетонат и трис-пивалоилтрифторацетонат ванадия. На основании анализа спектральных характеристик в ИК-диапазоне синтезированных хелатов установлено, что в ходе электролиза был сформирован квазиароматический металлоцикл, являющийся базовым структурным элементом комплексов. Периферийные группы лигандов (трет-бутил и трифторметил) остались без изменений под воздействием электрического тока.

Ключевые слова: трис-трифторацетилацетонат ванадия, трис-пивалоилтрифторацетонат ванадия, хелат, ИК-спектр, полоса поглощения

Для цитирования. Костюк, Н. Н. Анализ спектральных характеристик фторсодержащих β-дикетонатов ванадия(III) / Н. Н. Костюк, Т. А. Дик, А. Р. Цыганов // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2024. – Т. 68, № 5. – С. 373–380. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2024-68-5-373-380>

Nikolai N. Kostyuk¹, Tatiana A. Dick¹, Academician Aliaksandr R. Tsyhanau²

¹Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

²Belarusian State Technological University, Minsk, Republic of Belarus

**ANALYSIS OF SPECTRAL CHARACTERISTICS OF FLUORINE CONTAINING VANADIUM(III)
β-DIKETONATES**

Abstract. Vanadium tris-trifluoroacetylacetonate and tris-pivaloyltrifluoroacetonate were obtained by electrochemical synthesis. Based on the analysis of the spectral characteristics in the IR range of the synthesized chelates, it was established that during electrolysis a quasi-aromatic metallocycle was formed that is the basic structural element of the complexes. The peripheral groups of ligands (tert-butyl and trifluoromethyl) remained unchanged when exposed to electric current.

Keywords: vanadium tris-trifluoroacetylacetonate, vanadium tris-pivaloyltrifluoroacetonate, chelate, IR spectrum, absorption band

For citation. Kostyuk N. N., Dick T. A., Tsyhanau A. R. Analysis of spectral characteristics of fluorine containing vanadium(III) β-diketonates. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2024, vol. 68, no. 5, pp. 373–380 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2024-68-5-373-380>

Введение. Ванадий принадлежит к числу металлов, являющихся востребованными для научных, технических и технологических сфер деятельности. До 80 % производящегося ванадия используется для легирования чугунов и сталей. Вместе с тем развиваются и другие направления использования металла. В различных видах (порошок, прутки, проволока, лист) ванадий востребован в приборостроительной, аэрокосмической, стекольной, нефтехимической и других отраслях промышленности [1].

В природе ванадий в чистом виде не встречается. Он относится к категории рассеянных элементов. В большинстве случаев его добыча осуществляется в качестве побочного продукта переработки полиметаллических руд. Очень богатыми по содержанию ванадия считаются руды, содержащие более 1 % металла. Рентабельным для обогащения является рудное сырье, содержащее 0,1 % ванадия [1]. Потребление ванадия различными отраслями промышленности постоянно растет. В связи с этим востребованными являются технологии и технические приемы, позволяющие снижать объем потребления ванадия в конкретном производстве. Например, используется в судостроительной, автомобильной, аэрокосмической и химической промышленности ванадиевая фольга. Однако большим потенциалом в плане экономии металла обладают пленочные технологии. Одним из основных методов получения пленок и тонких покрытий является CVD-метод (газофазное разложение металлосодержащих летучих соединений). В качестве летучих металлосодержащих соединений (прекурсоров CVD-процессов) широко используются β -дикетонаты ванадия [2; 3]. Кроме того, β -дикетонаты ванадия могут быть использованы в качестве катализаторов полимеризации пропилена при низких температурах в режиме живой полимеризации, а также сополимеризации этилена с пропиленом [4].

Постоянно расширяющаяся сфера использования β -дикетонатов ванадия требует возвращения к вопросу их получения, так как реализация CVD-процессов сопряжена с использованием ультрачистых прекурсоров. Методом, дающим возможность получения высокочистых соединений металлов, является электрохимический синтез [5]. Использование электролиза позволяет получать в одну стадию ультрачистые β -дикетонаты переходных металлов. Однако при проведении электрохимического синтеза возможна трансформация самого лиганда за счет вовлечения в процесс синтеза либо периферийных групп β -дикетона, либо его димеризации за счет отрыва второго протона в Υ -положении. Поэтому использование электрохимического метода синтеза требует надежного контроля за процессами образования основного координационного узла хелата (квазиароматического металлоцикла) и состоянием периферийных групп. В данном случае для реализации полноценного контроля наиболее эффективен метод ИК-спектроскопии.

Надо отметить также, что наибольшей летучестью обладают фторсодержащие β -дикетонаты металлов [2; 3]. Во фторсодержащих β -дикетонах на фтор замещаются полностью или частично протоны периферийных групп. Учитывая их повышенную летучесть, фторсодержащие β -дикетонаты наиболее востребованы для реализации CVD-процессов.

В связи с вышеизложенным, целью настоящей работы является получение пивалоилтрифторацетоната и трифторацетилацетоната ванадия(III) электрохимическим методом и осуществление контроля за целевыми продуктами методом ИК-спектроскопии путем детального отнесения частот колебаний в спектрах поглощения.

Материалы и методы исследования. В качестве исходных лигандов использовались трифторацетилацетон (1,1,1-трифтор-2,4-пентандион, Htfac, $C_5H_5O_2F_3$) и пивалоилтрифторацетон (1,1,1-трифтор-5,5-диметил-2,4-гександион, Hptfa, $C_8H_{11}O_2F_3$) Merck или Aldrich, которые перегонялись непосредственно перед проведением электролиза.

При проведении электрохимических синтезов трифторацетилацетоната и пивалоилтрифторацетоната ванадия(III) в качестве растворителей использовали воду дистиллированную или бидистиллят, ацетонитрил квалификации «для хроматографии», бензол и дихлорметан ч. д. а. Ацетонитрил дополнительно перегоняли над осушителями непосредственно перед экспериментом.

Электролиз проводили в бездиафрагменной электрохимической ячейке при постоянном токе от стабилизированного источника питания в инертной атмосфере (аргон) в потенциометрическом режиме при напряжении 3 В. В качестве электролита использовали раствор 0,1 М бромид тетраэтиламмония и 1 М трифторацетилацетона или пивалоилтрифторацетона в ацетонитриле. Анодом служила пластина из ванадия марки ВнПн 1 (чистота металла более 99), катодом – фольга из никеля. Температура электролита поддерживалась равной $40 \pm 0,5$ °С с помощью термостата U-15. Полученные трифторацетилацетонат и пивалоилтрифторацетонат ванадия(III) после упаривания на роторном испарителе реакционной смеси экстрагировали бензолом или смесью 1 : 1 бензола и дихлорметана и повторно перекристаллизовывали из дихлорметана.

ИК-спектры в интервале частот 4000–400 см^{-1} регистрировали на спектрофотометре Specord IR-75. Образцы готовили в виде таблеток с бромидом калия и суспензий в вазелиновом масле.

Содержание ванадия в полученных соединениях определяли гравиметрическим методом. Весовая форма – V_2O_5 . Найденное содержание ванадия в полученных соединениях соответствует $[\text{V}(\text{tfac})_3]$ и $[\text{V}(\text{ptfa})_3]$.

Результаты и их обсуждение. Отнесение частот колебаний в ИК-спектрах трифторацетил-ацетоната и пивалоилтрифторацетоната ванадия(III) осуществлялось на основании расчетных работ [6–10]. В [6] установлено, что влияние кинематических параметров на изменение колебательного спектра, в частности, для полос поглощения валентных колебаний $\nu(\text{MO})$, является значительным. Частоты $\nu(\text{MO})$ (где М – металл) уменьшаются на сотни см^{-1} при увеличении массы периферийных групп от 1 до 19 у. е. Так, частоты колебаний 692 и 447 см^{-1} для $[\text{Cu}(\text{acac})_2]$ (бис-ацетилацетонат меди) предельно уменьшаются до 450 и 275 см^{-1} соответственно. Эти данные получены для симметричных хелатных циклов, т. е. имеющих одинаковые периферийные группы. В [7] исследовалось влияние кинематических параметров на валентные колебания CO -, CC -связей квазиароматического металлокомплекса для несимметричных хелатов различных металлов. Было установлено, что вариация массы центрального атома в пределах от 52 у. е. (хром) до 270 у. е. (ион уранила) не приводит к заметному изменению значений частот валентных колебаний $\nu(\text{CO})$ и $\nu(\text{CC})$. Из распределения потенциальной энергии по естественным колебательным координатам следует также, что обсуждаемые колебания носят смешанный характер и не могут быть использованы в качестве аналитических при интерпретации ИК-спектров. Данное положение совпадает с выводами работы [6]. Для несимметричных хелатов также было исследовано влияние замены периферийных метильных групп на такие группы, как трет-бутильные, трифторметильные и фенильные. В результате расчета частот нормальных колебаний и распределения потенциальной энергии выяснилось, что в случае симметричного хелата увеличение массы периферийной группы приводит к понижению всех частот в исследуемой спектральной области (1650–1500 см^{-1}) на 10–15 см^{-1} . В случае асимметричного хелатного цикла значительных изменений в спектре не обнаружено.

Поскольку в нашей работе оба исследуемых соединения имеют в качестве лигандов трифторацетилацетон и пивалоилтрифторацетон, которые дают асимметричные, с точки зрения периферийных групп, хелаты, то для детальной интерпретации полученных нами ИК-спектров корректно использование результатов расчетных статей [6–10].

В табл. 1 представлены значения колебательных частот ИК-спектра трис-трифторацетил-ацетоната ванадия. В интервале частот 2940–2850 см^{-1} наблюдается три полосы поглощения, принадлежащие к валентным $\nu(\text{CH})$ метильных групп. В более низкочастотной области спектра полосы поглощения с максимумами 1447, 1023, 1008 см^{-1} принадлежат деформационным колебаниям $\delta(\text{CH}_3)$. Все три перечисленные полосы поглощения являются характеристичными. В целом характеристичность наблюдаемых полос поглощения в ИК-спектре трис-трифторацетилацетоната ванадия составляет 26 %.

В интервале частот 1605–1550 см^{-1} наблюдаются четыре полосы поглощения, две из которых (1604 и 1530 см^{-1}) имеют очень сильную и сильную интенсивность соответственно. Такая спектральная картина характерна для полос поглощения, где значительный вклад в их интенсивность вносят валентные колебания $\nu(\text{CO})$ и $\nu(\text{CC})$. Для полос поглощения с максимумом 1550 см^{-1} вклад валентных колебаний $\nu(\text{CO})$ составляет 40 %, $\nu(\text{CC})_{\text{ch}}$ – 30 % и $\nu(\text{CC})$ связи $\text{C}-\text{CH}_3$ – 8 % [7]. Для полосы поглощения с максимумом 1513 см^{-1} вклад валентных колебаний $\nu(\text{CO})$ составляет 38 %, $\nu(\text{CC})_{\text{ch}}$ – 9 %, $\nu(\text{CC})$ связи $\text{C}-\text{CH}_3$ – 12 % и деформационных колебаний $\delta(\text{CCH}_3)$ – 24 % [7]. Понижение вклада валентных колебаний $\nu(\text{CO})$ и $\nu(\text{CC})_{\text{ch}}$ в формирование абсорбционных полос спектра при продвижении в более низкочастотную область является характерным для β -дикетонатов переходных металлов [8; 10]. Кроме перечисленных выше полос поглощения достаточно весомый вклад валентных колебаний $\nu(\text{CO})$ и $\nu(\text{CC})_{\text{ch}}$ наблюдается для полос поглощения с максимумами 1420, 1362, 1290, 1194 и 947 см^{-1} . Как видно из представленных данных bathochromный сдвиг для карбонильных групп составляет более 100 см^{-1} , что является характерным признаком образования квазиароматического металлоцикла.

Т а б л и ц а 1. Значения колебательных частот (cm^{-1}) ИК-спектра трифторацетилацетоната ванадия(III) и их отнесениеT a b l e 1. Vibrational frequencies (cm^{-1}) of the IR spectrum of vanadium tris-trifluoroacetylacetonate (III) and their assignment

[V(tfac) ₃]	Отнесение Assignment
2935 о. сл.	$\nu(\text{CH})_{\text{CH}_3}$
2930 пл.	$\nu(\text{CH})_{\text{CH}_3}$
2860 о. сл.	$\nu(\text{CH})_{\text{CH}_3}$
1604 о. с., ш.	$\nu(\text{CC})_{\text{ch}} + \nu(\text{CO}) + \delta(\text{CH}_3)$
1550 пл.	$\nu(\text{CO}) + \nu(\text{CC})_{\text{ch}} + \nu(\text{CC})$
1530 с.	$\nu(\text{CC})_{\text{ch}} + \nu(\text{CO}) + \delta(\text{CH}_3)$
1513 пл.	$\nu(\text{CO}) + \nu(\text{CC})_{\text{ch}} + \nu(\text{CC}) + \delta(\text{CCH}_\gamma)$
1464 пл.	$\nu(\text{CO}) + \delta(\text{CCH}_\gamma)$
1447 ср.	$\delta(\text{CH}_3)$
1420 пл.	$\nu(\text{CO}) + \nu(\text{CC}) + \nu(\text{CC})_{\text{ch}} + \delta(\text{CCH}_\gamma) + \delta_{\text{ch}}$
1362 ср.	$\nu(\text{CO}) + \nu(\text{CC}) + \delta_{\text{ch}} + \delta(\text{CF}_3) + \delta(\text{CH}_3)$
1290 о. с., ш.	$\nu(\text{CO}) + \nu(\text{CC}) + \nu(\text{CC})_{\text{ch}} + \delta(\text{CCH}_\gamma) + \delta_{\text{ch}}$
1228 ср.	$\nu(\text{CF}) + \delta(\text{CF}_3)$
1194 ср.	$\nu(\text{CO}) + \nu(\text{CC}) + \delta(\text{CCH}_\gamma)$
1147 о. с., ш.	$\nu(\text{CF}) + \delta(\text{CF}_3)$
1135 пл.,	$\nu(\text{CF}) + \delta(\text{CF}_3)$
1023 сл.	$\delta(\text{CH}_3)$
1008 сл.	$\delta(\text{CH}_3)$
947 ср.	$\nu(\text{CO}) + \nu(\text{CC})_{\text{ch}} + \delta_{\text{ch}}$
798 ср.	$\nu(\text{CF}) + \delta(\text{CF}_3) + \delta(\text{CH}_\gamma)$ (внеплоскостные)
733 ср.	δ_{ch} (внеплоскостные)
615 пл.	$\nu(\text{VO}) + \delta(\text{CCF}_3) + \delta(\text{CF}_3) + \delta(\text{CCH}_3) + \delta_{\text{ch}}$
593 с.	$\nu(\text{CO}) + \nu(\text{CC}) + \delta(\text{CH}_3) + \delta_{\text{ch}}$ (внеплоскостные) + $\delta(\text{CCH}_3)$ (внеплоскостные)
526 сл.	$\nu(\text{VO}) + \delta(\text{CF}_3)$
522 пл.	$\nu(\text{VO}) + \delta(\text{CF}_3)$
433 ср.	$\nu(\text{VO}) + \nu(\text{CCC})_{\text{ch}} + \nu(\text{CC}) + \delta_{\text{ch}}$
400 сл.	$\nu(\text{VO}) + \nu(\text{CC}) + \delta_{\text{ch}} + \delta(\text{CCH}_3)$

П р и м е ч а н и я: с. – сильная, ср. – средняя, сл. – слабая, о. с. – очень сильная, о. сл. – очень слабая, ш. – широкая, пл. – плечо, ch – хелат, ν – валентные колебания, δ – деформационные колебания.

N o t e s: c. – strong, ср. – average, сл. – weak, о. с. – very strong, о. сл. – very weak, ш. – wide, пл. – shoulder, ch – chelate, ν – stretching vibrations, δ – deformation vibrations.

Начиная с полос поглощения с максимумом 1228, а также 1147 и 1135 cm^{-1} , проявляются валентные $\nu(\text{CF})$ и деформационные $\delta(\text{CF}_3)$ колебания. Для полосы поглощения с максимумом 798 cm^{-1} к валентным и деформационным колебаниям трифторметильной группы дополнительно вносят свой вклад деформационные внеплоскостные колебания (CH_γ). Перечисленные выше абсорбционные полосы свидетельствуют о наличии в составе хелата трифторметильной группы.

Начиная с полосы поглощения с максимумом 615 cm^{-1} вплоть до 400 cm^{-1} , в пять полос поглощения из шести вносят вклад валентные колебания $\nu(\text{VO})$ (табл. 1), что также подтверждает успешное формирование квазиароматического металлоцикла в ходе электролиза и согласуется со спектральной картиной, представленной в интервале частот 1605–1500 cm^{-1} .

В табл. 2 представлены значения колебательных частот ИК-спектра трис-пивалоилтрифторацетоната ванадия и их отнесение. В высокочастотной области спектра поглощения 2870–2760 cm^{-1} наблюдаются две полосы поглощения с максимумами 2860 и 2769 cm^{-1} , принадлежащие валент-

ным колебаниям $\nu(\text{CH})$ метильных групп. В более низкочастотной области спектра наблюдаются деформационные колебания метильных групп. Так, полосы поглощения с максимумами 1440, 1336 и 1027 cm^{-1} относятся к деформационным колебаниям $\delta(\text{HCH})$ метильных групп, причем две последние полосы являются характеристичными. Кроме того, характеристичными являются полосы поглощения с максимумом 1202 cm^{-1} , принадлежащие к деформациям трет-бутильной периферийной группы $\delta(\text{C}(\text{CH}_3)_3)$, и полоса поглощения с максимумом 716 cm^{-1} , принадлежащая внеплоскостным деформациям хелатного цикла $\delta(\text{CH})$. Всего в ИК-спектре трис-пивалоилтрифторацетоната ванадия присутствуют шесть характеристичных полос (табл. 2), что составляет 18,2 % от общего числа наблюдаемых абсорбционных полос.

Т а б л и ц а 2. Значения колебательных частот (cm^{-1}) ИК-спектра пивалоилтрифторацетоната ванадия(III) и их отнесение

T a b l e 2. Vibrational frequencies (cm^{-1}) of the IR spectrum of vanadium tris-pivaloyltrifluoroacetate (III) and their assignment

[V(pta) ₃]	Отнесение Assignment
2860 сл.	$\nu(\text{CH})_{\text{CH}_3}$
2769 сл.	$\nu(\text{CH})_{\text{CH}_3}$
1615 о. с.	$\nu(\text{CO}) + \nu(\text{CC})_{\text{ch}} + \delta(\text{CH}_\gamma) + \delta_{\text{ch}}$
1602 ср.	$\nu(\text{CO}) + \nu(\text{CC})_{\text{ch}} + \delta(\text{CH}_\gamma) + \delta_{\text{ch}}$
1544 ср.	$\nu(\text{CO}) + \nu(\text{CC})_{\text{ch}} + \nu(\text{CC})$
1513 с.	$\nu(\text{CO}) + \nu(\text{CC})_{\text{ch}} + \nu(\text{CC}) + \delta(\text{CCH}_\gamma)$
1505 пл.	$\nu(\text{CO}) + \nu(\text{CC})_{\text{ch}} + \delta(\text{CH}_\gamma) + \delta_{\text{ch}}$
1450 пл.	$\nu(\text{CO}) + \delta(\text{CCH}_\gamma) + \delta(\text{HCH})_{\text{CH}_3} + \delta_{\text{ch}}$
1440 о. с.	$\delta(\text{HCH})_{\text{CH}_3} + \delta_{\text{ch}}$
1393 сл.	$\nu(\text{CC}) + \delta_{\text{ch}} + \delta(\text{HCH})_{\text{CH}_3}$
1370 пл.	$\nu(\text{CC}) + \delta_{\text{ch}} + \delta(\text{HCH})_{\text{CH}_3}$
1367 пл.	$\nu(\text{CC}) + \delta_{\text{ch}} + \delta(\text{HCH})_{\text{CH}_3}$
1360 ср.	$\nu(\text{CC}) + \delta_{\text{ch}} + \delta(\text{CF}_3) + \delta(\text{HCH})_{\text{CH}_3}$
1336 о. сл.	$\delta(\text{HCH})_{\text{CH}_3}$
1303 о. с.	$\nu(\text{CO}) + \nu(\text{CC}) + \delta(\text{CCH}_\gamma)$
1251 с.	$\nu(\text{CO}) + \nu(\text{CC}) + \nu(\text{CF}) + \nu(\text{CCH}_3) + \delta(\text{CF}_3) + \delta(\text{CCH}_\gamma)$
1226 сл.	$\nu(\text{CF}) + \delta(\text{CF}_3) + \delta(\text{C}(\text{CH}_3)_3)$ (внеплоскостные)
1202 пл.	$\delta(\text{C}(\text{CH}_3)_3)$
1186 о. с.	$\nu(\text{CC})_{\text{CCH}_3} + \nu(\text{CC}) + \delta(\text{C}(\text{CH}_3)_3)$
1145 пл.	$\nu(\text{CF}) + \nu(\text{CCH}_3) + \delta(\text{CF}_3) + \delta(\text{C}(\text{CH}_3)_3) + \delta_{\text{ch}}$
1136 с.	$\nu(\text{CF}) + \nu(\text{CC})_{\text{ch}} + \delta(\text{CF}_3)$
1102 сл.	$\nu(\text{CF}) + \delta(\text{CF}_3) + \delta(\text{CCH})_{\text{CH}_3}$
1027 сл.	$\delta(\text{HCH})_{\text{CH}_3}$
941 о. сл.	$\nu(\text{CO}) + \nu(\text{CC}) + \nu(\text{CCH}_3) + \delta_{\text{ch}}$
862 о. сл.	$\nu(\text{CC}) + \delta(\text{CCH})_{\text{CH}_3}$
843 ср.	$\delta(\text{CCH}_\gamma) + \delta_{\text{ch}}$
799 ср.	$\nu(\text{CF}) + \delta(\text{CF}_3) + \nu(\text{CC}) + \nu(\text{CCH}_3) + \delta_{\text{ch}} + \delta(\text{CH}_\gamma)$ (внеплоскостные)
764 сл.	$\nu(\text{CF}) + \delta(\text{CF}_3) + \delta(\text{CH}_\gamma) + \delta_{\text{ch}}$ (внеплоскостные)
716 сл.	δ_{ch} (внеплоскостные)
688 ср.	$\nu(\text{VO}) + \nu(\text{CO}) + \delta(\text{CF}_3)$
575 ср.	$\nu(\text{VO}) + \nu(\text{CO}) + \nu(\text{CC})_{\text{ch}} + \delta(\text{CF}_3)$
510 о. сл.	$\nu(\text{VO}) + \delta(\text{CF}_3) + \delta(\text{C}(\text{CH}_3)_3) + \delta(\text{FCF})$
467 сл.	$\nu(\text{VO}) + \delta(\text{C}(\text{CH}_3)_3)$

В интервале частот 1620–1500 cm^{-1} присутствуют пять полос поглощения с максимумами 1615, 1602, 1544, 1513 и 1505 cm^{-1} . Основной вклад в формирование данных абсорбционных полос вносят валентные колебания полуторных связей $\nu(\text{CO})$ и $\nu(\text{CC})$ квазиароматического металлоцикла.

Частично в перечисленные полосы поглощения вносят вклад валентные колебания $\nu(\text{CC})$ трет-бутильных групп, деформационные колебания протона в Υ -положении $\delta(\text{CH}_\gamma)$ и внеплоскостные деформационные колебания хелатного цикла $\delta(\text{CH})$. Валентные колебания $\nu(\text{CO})$ и $\nu(\text{CC})_{\text{ch}}$ квазиароматического металлоцикла также проявляются в ряде составных частот в низкочастотной области спектра, но вклад валентных колебаний карбонильных групп и полуторной CC -связи существенно снижается с уменьшением значений частот [8]. В целом батохромное смещение валентных колебаний карбонильных групп для пивалоилтрифторацетона в результате хелатообразования составляет более 100 cm^{-1} .

Начиная с полосы поглощения с максимумом 1251 cm^{-1} , свой вклад в их интенсивность вносят валентные колебания $\nu(\text{CF})$. Для полос поглощения с максимумами 1226, 1145, 1136, 1102 и 764 cm^{-1} довольно значительный вклад вносят валентные $\nu(\text{CF})$ и деформационные колебания $\delta(\text{CF}_3)$ трифторметильных групп [6; 8; 9].

В интервале частот 700–400 cm^{-1} вклад в формирование полос поглощения с максимумами 688, 575, 510 и 467 cm^{-1} начинают вносить валентные колебания $\nu(\text{VO})$ хелата.

Представленная спектральная картина для обоих соединений показывает, что произошло формирование основного координационного узла хелата – квазиароматического металлоцикла. Это подтверждается наличием полос поглощения, состоящих из вклада в них валентных колебаний полуторных связей $\nu(\text{CO})$ и $\nu(\text{CC})_{\text{ch}}$, валентных колебаний $\nu(\text{VO})$, внеплоскостных деформационных колебаний хелата $\delta(\text{CH})$ (полоса с максимумом 716 cm^{-1} является характерной для данного колебания), а также внеплоскостными колебаниями протона в Υ -положении $\delta(\text{CH}_\gamma)$. Батохромный сдвиг частот колебаний карбонильных групп для обоих соединений составляет более 100 cm^{-1} , что является характерным при понижении кратности связи и образовании хелатного кольца. Наличие в ИК-спектре трис-пивалоилтрифторацетоната ванадия валентных и деформационных колебаний трифторметильной группы свидетельствует о ее сохранности в ходе электрохимических превращений. Аналогичная спектральная картина проявляется и для трифторметильной группы трис-пивалоилтрифторацетоната ванадия. Наличие валентных $\nu(\text{CH})$ и деформационных колебаний $\delta(\text{CH}_3)$ также подтверждает отсутствие трансформации метильных групп в ходе электролиза. Для трис-пивалоилтрифторацетоната ванадия наблюдаются как валентные колебания $\nu(\text{CC})$, $\nu(\text{CCH}_3)$, так и деформационные $\delta(\text{C}(\text{CH}_3)_3)$, свидетельствующие о сохранности трет-бутильной группы.

Заключение. Таким образом, методом электрохимического синтеза получены трис-трифторацетилацетонат и трис-пивалоилтрифторацетонат ванадия. Синтезированные соединения были исследованы методами колебательной спектроскопии. Интерпретация наблюдаемых полос поглощения осуществлялась на основе расчетных литературных данных. В ИК-спектрах полученных соединений в интервале частот 1605–1500 cm^{-1} для трис-трифторацетилацетоната ванадия и 1620–1500 cm^{-1} для трис-пивалоилтрифторацетоната ванадия присутствуют полосы валентных колебаний $\nu(\text{CO})$ и $\nu(\text{CC})_{\text{ch}}$ квазиароматического металлоцикла. Батохромный сдвиг валентных колебаний карбонильных групп трифторацетилацетона и пивалоилтрифторацетона составил более 100 cm^{-1} . Это подтверждает образование квазиароматического металлоцикла в ходе электролиза. Наличие валентных и деформационных колебаний периферийных групп (метильных, трет-бутильной и трифторметильной) свидетельствует об отсутствии их трансформации под действием электрического тока. Подавляющее большинство полос поглощения, наблюдаемое в обоих спектрах синтезированных соединений, носят смешанный характер. В целом можно сделать вывод об успешном прохождении процесса комплексообразования по ходу электрохимического синтеза без трансформации периферийных групп.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Чапала, Ю. И. Ванадий: свойства и применение / Ю. И. Чапала. – М., 2018. – 28 с.
2. Сыркин, В. Г. CVD-метод. Химическое парофазное осаждение / В. Г. Сыркин. – М., 2000. – 490 с.
3. Летучесть и термическая устойчивость β -дикетонатных комплексов ванадила / И. П. Малкерова [и др.] // Журн. неорганической химии. – 2017. – Т. 62, № 6. – С. 838–841. <https://doi.org/10.7868/s0044457x17060137>
4. Vanadium-catalyzed ethylene-propylene copolymerization: the question of the metal oxidation state in ziegler-natta polymerization promoted by $(\beta\text{-diketonate})_3\text{V}$ / Y. Ma [et al.] // *Organometallics*. – 1999. – Vol. 18, N 15. – P. 2773–2781. <https://doi.org/10.1021/om9808763>
5. Костюк, Н. Н. Синтез ультрачистых хелатов меди / Н. Н. Костюк, Т. А. Дик // Журн. общ. химии. – 2020. – Т. 90, № 11. – С. 1773–1779. <https://doi.org/10.31857/s0044460x20110190>
6. Краденов, К. В. Анализ нормальных колебаний β -дикетонатов меди(II) / К. В. Краденов, Б. А. Колесов. – Новосибирск, 1986. – 41 с.
7. Дик, Т. А. Роль кинематических факторов в формировании CO-, CC-колебаний в β -дикетонатных металлокомплексах / Т. А. Дик, Н. Н. Костюк, Д. С. Умрейко // Журн. приклад. спектроскопии. – 1991. – Т. 54, № 5. – С. 736–739.
8. Краденов, К. В. Расчет распределения колебательной энергии по естественным координатам на примере β -дикетонатов меди(II) / К. В. Краденов, Б. А. Колесов. – Новосибирск, 1986. – 28 с. – Деп. в ВИНТИ, № 8695-V86.
9. Краденов, К. В. Влияние лигандных заместителей на колебания и силовую постоянную координационной связи в β -дикетонатах меди(II) / К. В. Краденов, Б. А. Колесов, И. К. Игуменов // Коорд. химия. – 1987. – Т. 13, № 9. – С. 1178–1187.
10. Расчет нормальных колебаний комплекса трис-ацетилацетоната хрома / С. Н. Слабженников [и др.] // Коорд. химия. – 2000. – Т. 26, № 2. – С. 102–111.

References

1. Chapala Yu. I. *Vanadium: properties and applications*. Moscow, 2018. 28 p. (in Russian).
2. Syrkin V. G. *CVD method. Chemical vapor deposition*. Moscow, 2000. 490 p. (in Russian).
3. Malkerova I. P., Makarevich A. M., Alikhanyan A. S., Kuz'mina N. P. Volatility and thermal stability of vanadyl β -diketonate complexes. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, 2017, vol. 62, pp. 818–821. <https://doi.org/10.1134/s0036023617060134>
4. Ma Yu., Reardon D., Gambarotta S., Yap G., Zahalka H., Lemay C. Vanadium-catalyzed ethylene-propylene copolymerization: the question of the metal oxidation state in ziegler-natta polymerization promoted by $(\beta\text{-diketonate})_3\text{V}$. *Organometallics*, 1999, vol. 18, no. 15, pp. 2773–2781. <https://doi.org/10.1021/om9808763>
5. Kostyuk N. N., Dick T. A. Synthesis of ultrapure copper chelates. *Russian Journal of General Chemistry*, 2020, vol. 90, pp. 2141–2146. <https://doi.org/10.1134/s1070363220110195>
6. Kradenov K. V., Kolesov B. A. *Analysis of normal vibrations of copper(II) β -diketonates*. Novosibirsk, 1986. 41 p. (in Russian).
7. Dick T. A., Kostyuk N. N., Umreiko D. S. Role of kinematic factors in the manifestation of CO and CC vibrations in β -diketonate metal complexes. *Journal of Applied Spectroscopy*, 1991, vol. 54, pp. 432–435. <https://doi.org/10.1007/bf00660017>
8. Kradenov K. V., Kolesov B. A. *Calculation of the distribution of vibrational energy over natural coordinates using copper(II) β -diketonates as an example, N 8695-V86*. Novosibirsk, 1986. 28 p. (in Russian).
9. Kradenov K. V., Kolesov B. A., Igumenov I. K. Effect of ligand substituents on the vibrations and force constant of the coordination bond in copper(II) β -diketonates. *Koordinatsionnaya khimiya = Soviet Journal of Coordination Chemistry*, 1987, vol. 13, no. 9, pp. 1178–1187 (in Russian).
10. Slabzhennikov S. N., Denisenko T. A., Litvinova O. B., Vovna V. I. Calculation of normal vibrations of chromium tris-acetylacetonate complex. *Koordinatsionnaya khimiya = Russian Journal of Coordination Chemistry*, 2000, vol. 26, no. 2, pp. 102–111 (in Russian).

Информация об авторах

Костюк Николай Николаевич – канд. хим. наук, вед. науч. сотрудник. Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: nnkostyuk@bsu.by.

Дик Татьяна Алексеевна – д-р физ.-мат. наук, вед. специалист. Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: dick@bsu.by.

Цыганов Александр Риммович – академик, д-р с.-х. наук, канд. хим. наук, профессор. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, Минск, Республика Беларусь). E-mail: tziganov@belstu.by.

Information about the authors

Kostyuk Nikolai N. – Ph. D. (Chemistry), Leading Researcher. Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nnkostyuk@bsu.by.

Dick Tatiana A. – D. Sc. (Physics and Mathematics), Leading Specialist. Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dick@bsu.by.

Tsyhanau Aliaksandr R. – Academician, D. Sc. (Agrarian), Ph. D. (Chemistry), Professor. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlov Str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: tziganov@belstu.by.

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

БИОЛОГИЯ
BIOLOGY

УДК 599.323.4+577.175.82+612.82+537.531
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2024-68-5-381-389>

Поступило в редакцию 19.04.2024
Received 19.04.2024

Н. В. Чуешова¹, В. М. Щемелев¹, член-корреспондент Ф. И. Висмонт², И. А. Чешик¹

¹*Институт радиобиологии Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Республика Беларусь*

²*Белорусский государственный медицинский университет, Минск, Республика Беларусь*

**ИЗМЕНЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ДОФАМИНА, СЕРОТОНИНА,
ИХ ПРЕДШЕСТВЕННИКОВ И ПРОИЗВОДНЫХ В ПРЕФРОНТАЛЬНОЙ КОРЕ
ГОЛОВНОГО МОЗГА МОЛОДЫХ КРЫС-САМЦОВ ПРИ ХРОНИЧЕСКОМ
ВОЗДЕЙСТВИИ НИЗКОИНТЕНСИВНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ**

Аннотация. Исследовано содержание ряда биогенных аминов, их предшественников и производных в префронтальной коре (ПФК) головного мозга крыс-самцов линии Wistar, подвергнутых хроническому воздействию низкоинтенсивного электромагнитного поля устройства Wi-Fi (2,45 ГГц, ППЭ_{max} – 5,83 мкВт/см², ППЭ_χ – 0,46 ± 0,37 мкВт/см², 24 ч/день, 7 дней в неделю) в период их раннего постнатального развития. Установлены изменения содержания дофамина, серотонина, их предшественников и метаболитов в ПФК головного мозга, что определяет развитие нейромедиаторных расстройств в центральной нервной системе, а в последствии – возникновение нарушений поведения, ухудшение социальной адаптации и когнитивных способностей. Выявленные изменения в дофаминергической системе ПФК головного мозга у крыс на ранних стадиях их постнатального развития свидетельствуют о необходимости дальнейшей гигиенической оценки безопасности длительного воздействия электромагнитного излучения на организм, особенно на головной мозг. Дальнейшие исследования в этом направлении позволят определить нейромедиаторные механизмы, лежащие в основе неблагоприятного воздействия низкоинтенсивных электромагнитных полей на центральную нервную систему, провести оценку их опасности и коррекцию существующих предельно допустимых уровней электромагнитного излучения с учетом реакции нейромедиаторных систем структур головного мозга на данный тип воздействия.

Ключевые слова: электромагнитное излучение, Wi-Fi, крысы Wistar, головной мозг, префронтальная кора, дофамин, серотонин

Для цитирования. Изменение содержания дофамина, серотонина, их предшественников и производных в префронтальной коре головного мозга молодых крыс-самцов при хроническом воздействии низкоинтенсивного электромагнитного поля / Н. В. Чуешова [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2024. – Т. 68, № 5. – С. 381–389. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2024-68-5-381-389>

Natalya V. Chueshova¹, Vladislav M. Schemelev¹, Corresponding Member Frantisek I. Vismont², Ihar A. Cheshik¹

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

²*Belarusian State Medical University, Minsk, Republic of Belarus*

**CHANGES IN THE CONTENT OF DOPAMINE, SEROTONIN, THEIR PRECURRENTS AND
DERIVATIVES IN THE PREFRONTAL CORTEX OF THE BRAIN OF YOUNG MALE RATS UNDER
CHRONIC EXPOSURE TO LOW-INTENSE ELECTROMAGNETIC FIELD**

Abstract. The content of a number of biogenic amines, their precursors, and derivatives was studied in the prefrontal cortex (PFC) of the brain of male Wistar rats exposed to chronic exposure to a low-intensity electromagnetic field of a Wi-Fi device (24 hours/day, 2.45 GHz, the power flux density did not exceed 583 μW/cm², amounting to average – 0.46 ± 0.37 μW/cm²) during their early postnatal development. Changes in the content of dopamine, serotonin, their precursors, and metabolites in

the PFC of the brain have been established, which determines the development of neurotransmitter disorders in the central nervous system, and subsequently the occurrence of behavioral disorders, the deterioration of social adaptation and cognitive abilities. The identified changes in the dopaminergic system of the PFC of the brain in rats at the early stages of their postnatal development indicate the need for a further hygienic assessment of the safety of long-term exposure to electromagnetic radiation on the body, especially on the brain. Further research in this direction will make it possible to determine neurotransmitter mechanisms underlying the adverse effects of low-intensity electromagnetic fields on the central nervous system, to assess their danger, and to correct the existing maximum permissible levels of electromagnetic radiation, taking into account the reaction of the neurotransmitter systems of brain structures to this type of impact.

Keywords: electromagnetic radiation, Wi-Fi, Wistar rats, brain, prefrontal cortex, dopamine, serotonin

For citation. Chueshova N. V., Schemelev V. M., Vismont F. I., Cheshik I. A. Changes in the content of dopamine, serotonin, their precursors and derivatives in the prefrontal cortex of the brain of young male rats under chronic exposure to low-intense electromagnetic field. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2024, vol. 68, no. 5, pp. 381–389 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2024-68-5-381-389>

Введение. Проблема безопасности использования беспроводной связи (сотовая связь, интернет) является особо актуальной и приобретает важную медицинскую и социальную значимость. Это обусловлено усложнением электромагнитной обстановки, невосприимчивостью органами чувств человека к электромагнитному излучению (ЭМИ), отсутствием полной ясности о последствиях и механизмах действия электромагнитных полей (ЭМП) различных частот. Все это способствует формированию глобальной экологической проблемы электромагнитного загрязнения окружающей среды и развитию дальнейших исследований влияния ЭМИ на организм человека [1–3].

Рост числа устройств и точек доступа к сети Интернет посредством Wi-Fi привел к постоянному круглосуточному воздействию электромагнитных полей диапазона радиочастот (ЭМП РЧ) на все слои населения, включая детей, беременных женщин и стариков, что, в свою очередь, может являться фактором риска развития множества заболеваний [1].

К одной из наиболее чувствительных, уязвимых систем организма к воздействию ЭМП РЧ относится центральная нервная система (ЦНС) [2–4]. В настоящее время имеет место лавинообразный рост числа научных исследований, посвященных эффектам, последствиям воздействия на организм ЭМП РЧ и, в частности, на метаболизм и транспорт нейромедиаторов [4; 5]. Показано, что микроволновое излучение, воздействуя на организм, может оказывать влияние на функциональное состояние ЦНС и проявляться головной болью, потерей памяти, расстройством режимов сна и бодрствования, повышенной нервозностью, снижением познавательной активности, когнитивными расстройствами [6].

По мнению E. R. Adair наблюдаемые изменения в поведенческих реакциях при воздействии ЭМП зависят от времени экспозиции, величины энергии и могут быть опосредованы вызываемым им нагреванием ткани [7]. Однако было установлено, что микроволновое излучение (2450 МГц, SAR 0,6 ВТ/кг) влияет на обучение и память даже при относительно низких значениях плотности потока электромагнитной энергии, которое не вызывает тепловых эффектов в тканях [8]. В то же время в ряде исследований не было обнаружено каких-либо отличий в пространственной ориентации, обучении и памяти животных при воздействии излучения РЧ [9]. Сведения о хроническом влиянии ЭМП Wi-Fi на функциональную активность головного мозга и его моноаминергических систем в настоящее время отсутствуют.

Как известно, моноаминергические системы у позвоночных осуществляют регуляцию нейроэндокринных, репродуктивных, пищеварительных и поведенческих функций [10]. Дофаминергическая система в префронтальной коре (ПФК) играет решающую роль в обеспечении когнитивных функций, включая обучение, память, исполнительные функции и контроль поведения. Показано, что передача информации от одной функциональной группы нейронов ПФК к другой находится под влиянием нейромодулирующего вещества – ДА [11].

В связи с этим представлялось интересным изучить влияние ЭМП РЧ на моноаминергические системы ПФК головного мозга – наиболее эволюционно молодой структуры, образующей тесные морфологические связи с другими структурами мозга: гипоталамусом, стриатумом, гиппокампом, корковыми полями лобной доли, поясной извилиной, дорсомедиальными ядрами та-

ламуса и его интраламинарной системой [12]. Были основания полагать, что нарушения в нейромедиаторных процессах в ПФК в раннем возрасте могут привести к ухудшению памяти, депрессиям, психическим и тревожным расстройствам в более позднем возрасте [13].

Цель работы – изучение содержания дофамина, серотонина, их предшественников и производных в префронтальной коре головного мозга у крыс при взрослении в условиях хронического воздействия низкоинтенсивного электромагнитного поля устройства Wi-Fi (2,45 ГГц).

Материалы и методы исследования. Исследования выполнены на 48 белых крысах-самцах линии Вистар возрастом 50–52 суток и массой $160,1 \pm 1,4$ г на начало эксперимента. Все животные были разделены на две группы: 1. Контроль ($n = 24$) – животные, не подвергавшиеся воздействию ЭМП; 2. Животные ($n = 24$), подвергавшиеся воздействию ЭМП устройства Wi-Fi, начиная с возраста 50 дней и до достижения ими 9 месяцев. Выведение из зоны облучения и определение содержания медиаторов моноаминергических (дофамин- и серотонинергических) систем, их предшественников и метаболитов в ПФК проводили при достижении животными возраста 3, 6 и 9 месяцев.

Принимая во внимание известные данные целого ряда научных работ о происходящих в течение суток существенных колебаниях уровня гормонов и биогенных аминов в крови и связанных с ними изменениях энергетического и пластического обменов, испытания в этом исследовании проводились в строго определенное время – с 8.00 до 12.00 [14].

Исследования проводились в виварии Государственного научного учреждения «Институт радиобиологии Национальной академии наук Беларуси» после одобрения Этическим комитетом данной организации (протокол заседания № 3 от 24.02.2021). Животные как контрольной, так и экспериментальных групп содержались в соответствии с принципами Надлежащей лабораторной практики (OECD Guide 1:1998, IDT, ГОСТ 33044–2014) в условиях оптимальной внешней температуры (21–23 °С), циклов света/темноты (12/12 ч), бесперебойного электропитания, защиты от инфекций, шума и других факторов окружающей среды. Манипуляции на животных проводились с соблюдением положений «Европейской конвенции о защите позвоночных животных, используемых для экспериментальных и других научных целей» (Directive 2010/63/EU).

Источником ЭМП являлся маршрутизатор Netis WF2780 (Netis SYSTEMS, China). Облучение проводилось на частоте 2,45 ГГц, 7 дней в неделю, 24 ч/день. Роутер размещался в центральной части рабочей зоны (1,2 × 0,8 м), в которой находились 4 пластиковые клетки с животными. Расстояние от источника излучения (роутер) до клетки составляло 20 см. Во время облучения осуществлялся дистанционный контроль наличия электромагнитного поля. Плотность потока электромагнитной энергии (ППЭ) измерялась прибором ПЗ-41 (СКБ Питон, РФ) в 8 точках на расстоянии 20 см от источника облучения и не превышала $5,83$ мкВт/см², составляя в среднем – $0,46 \pm 0,37$ мкВт/см².

По окончании электромагнитного воздействия животных контрольной ($n = 8$) и экспериментальной ($n = 8$) групп соответствующего возраста наркотизировали (эфирный наркоз), подвергали декапитации, выделяли префронтальную кору больших полушарий головного мозга с немедленной ее глубокой заморозкой в жидком азоте. Затем выделенный биологический материал гомогенизировали в 10-кратном объеме 0,2 М раствора хлорной кислоты, содержащей 40 мг/л Na₂S₂O₅, 40 мг/л ЭДТА, 1 мкМ ванилиновой кислоты – внутренний стандарт. Гомогенизацию проводили на холоде с помощью ультразвукового гомогенизатора Biologics Model 3000 (USA). Полученную суспензию центрифугировали в течение 15 мин при +4 °С и 12000 g на рефрижераторной центрифуге Centurion K220R (GB). Полученный супернатант хранили при –80 °С в низкотемпературном морозильнике HFU486 Basic (Heraeus, Германия) для последующей процедуры.

Разделение биогенных аминов и родственных соединений проводили в соответствии с методикой, описанной в [15], с помощью ион-парной высокоэффективной жидкостной хроматографии на оборудовании системы Agilent серии 1100 (США) с детектированием по флуоресценции. Подвижной фазой являлся буферный раствор, содержащий 12 г/л NaH₂PO₄, 0,122 г/л гидрата октансульфоната натрия, 0,04 г/л ЭДТА, 52 мл/л ацетонитрила, 1,6 мл/л CH₃COOH (pH 3,75),

профильированный через нейлоновый фильтр с размером пор 0,22 мкм. Условия разделения: колонка Zorbax Eclipse Plus C18 Narrow Bore RR 2,1 × 150 мм; 3,5-Micron (Agilent Technologies, США) термостатировалась при 28 °С. Скорость потока подвижной фазы – 0,2 мл/мин. Детектирование: длина волны возбуждения – 280 нм, излучения – 340 нм.

Смесь стандартов, используемая для калибровки, обрабатывалась как описано выше и включала: тирозин (Tyr), 3,4-диоксифенилаланин (DOPA), дофамин (DA), норадреналин (NE), 3,4-диоксифенилуксусная кислота (DOPAC), триптофан (Trp), 5-окситриптофан (5-НТP), серотонин (5-НТ) и 5-оксииндолуксусная кислота (5-НИАА) в концентрациях 1 мкмоль/л. Идентификация определяемых соединений и количественная обработка хроматограмм проводились с использованием метода внутреннего стандарта с помощью программы ChemStation версии В.04.03.

Статистическая обработка полученных данных проводилась с использованием пакета статистических программ Graph Pad Prism 8.3. Значимость наблюдаемых отличий двух независимых групп по количественному признаку оценивали с помощью непараметрического критерия Манна–Уитни (*U*-test). Данные представлены как медиана (Me – 50-й перцентиль), интерквартильный интервал 25–75 % (LQ; UQ). Различия считали статистически значимыми при вероятности ошибки менее 5 % ($p < 0,05$).

Результаты и их обсуждение. Исследовано содержание ряда биогенных аминов, их предшественников и производных в ПФК головного мозга крыс-самцов, подвергнутых хроническому воздействию низкоинтенсивного электромагнитного поля устройства Wi-Fi на протяжении раннего постнатального развития.

Выявлено, что хроническое воздействие ЭМП Wi-Fi на организм в период его раннего постнатального развития – 3 месяца, приводит к изменениям содержания дофамина, его предшественников и метаболита норэпинефрина в ПФК, а именно к тенденции (менее 4 % по сравнению с контрольным уровнем) в снижении Tyr, NE и DA при увеличении уровня DOPA (табл. 1).

Т а б л и ц а 1. Содержание дофамина, его предшественников и метаболита норэпинефрина в префронтальной коре головного мозга крыс-самцов в возрасте 3, 6 и 9 месяцев, подвергнутых хроническому воздействию ЭМП

T a b l e 1. Content of dopamine, its precursors and norepinephrine metabolite in the prefrontal cortex of male rats aged 3, 6 and 9 months exposed to chronic exposure to EMF

Экспериментальные группы Experimental groups	Исследуемый показатель The indicator under study			
	Tyr, нмоль/г	DOPA, нмоль/г	DA, нмоль/г	NE, нмоль/г
<i>3 месяца</i>				
Контроль	86,15 (81,03; 98,51)	0,34 (0,24; 0,43)	1,92 (1,78; 3,70)	3,29 (3,07; 3,60)
Wi-Fi	84,18 (81,95; 93,79)	0,37 (0,31; 0,43)	1,73 (1,48; 2,48)	3,25 (2,98; 3,31)
<i>p</i>	0,04	0,01	0,54	0,02
<i>6 месяцев</i>				
Контроль	95,68 (79,98; 96,36)	0,23 (0,22; 0,36)	1,23 (1,03; 1,49)	4,17 (3,63; 4,26)
Wi-Fi	77,48 (69,50; 84,09)	0,45 (0,39; 0,56)	4,60 (3,30; 4,98)	3,62 (3,34; 3,91)
<i>p</i>	0,05	0,03	0,02	0,13
<i>9 месяцев</i>				
Контроль	86,90 (83,70; 102,4)	0,10 (0,08; 0,13)	0,95 (0,65; 1,25)	3,89 (3,13; 4,04)
Wi-Fi	75,71 (64,76; 83,58)	0,09 (0,07; 0,1)	1,15 (0,91; 1,25)	3,64 (3,28; 3,91)
<i>p</i>	0,03	0,47	0,54	0,68

П р и м е ч а н и я: *p* – уровень значимости различий к группе необлученных животных (тест Манна–Уитни); Tyr – тирозин; DOPA – диоксифенилаланин; DA – дофамин; NE – норэпинефрин.

N o t e s: *p* – level of significance of differences in the group of non-irradiated animals (Mann–Whitney test); Tyr – tyrosine; DOPA – dioxyphenylalanine; DA – dopamine; NE – norepinephrine.

Установлено, что выявленная слабая реакция дофаминергической системы на хроническое электромагнитное воздействие у молодого организма (3 месяца) сменяется выраженными изменениями содержания нейромедиаторов дофаминергических структур в ПФК головного мозга у животных, подвергнутых более длительной экспозиции – 6 месяцев, что проявилось статистически значимым снижением уровня Тгт (на 19,1 % при $p = 0,05$) и увеличением концентрации его метаболитов – DOPA и DA, практически в 2 ($p = 0,03$) и 4 раза соответственно при сравнении с контрольным значением. Обнаруженное снижение концентрации Тгт сохраняется и у животных в возрасте 9 месяцев, что соответствовало 87,1 % ($p = 0,03$) по отношению к контролю при нормализации уровня DA и DOPA.

Выраженное снижение уровня Тгт у животных, подвергнутых хроническому воздействию ЭМП, вероятно, обусловлено его вовлечением в образование DOPA, увеличение содержания которого указывает на нарастание синтеза DA [16]. По мнению ряда авторов, воздействие хронического стресса на организм, особенно в раннем возрасте, может привести к префронтальной дисфункции и структурно-функциональным изменениям, в том числе изменению возбудимости рецепторов нейронов в ПФК, что, в свою очередь, приводит к когнитивной дисфункции, связанной с нарушением рабочей памяти, поведенческой гибкостью и планированием на будущее [17]. Общеизвестно, что внимание, рабочая память и принятие решений приписывается ПФК. Выполнение данных функций ПФК невозможно без участия нейромедиаторов, в частности, DA, которому в этих процессах отводится важнейшая роль [18].

До сих пор существует гипотеза, что дисфункция дофаминергических систем в ПФК (особенно в дорсолатеральной префронтальной коре) приводит к социальным и когнитивным дефицитам. Показано, что подавление префронтальных дофаминергических систем ухудшает социальные взаимодействия, что свидетельствует об участии DA структур префронтальной коры в регуляции социального поведения. А, как известно, социальный стресс, который также может вызвать социальную изоляцию, способствует выбросу DA в префронтальную кору. Усиленное высвобождение DA в медиальной ПФК отмечено в эксперименте у животных на модели с низким уровнем социального взаимодействия, включая модели психосоциального стресса и модели животных с эндофенотипами шизофрении [19].

Можно предположить, что установленное нами в эксперименте значительное повышение содержания DA в ПФК (6 месяцев) будет сказываться на процессах познания, мотивации, повышенного настроения, эффекте вознаграждения, а также способствовать повышенной уязвимости к стрессу, агрессивному поведению и формированию зависимостей (например, злоупотреблению наркотиками) и ассоциировано с развитием в последующем ряда психических заболеваний [14; 15].

Общеизвестно, что ПФК тесно взаимосвязана с многочисленными корковыми и подкорковыми структурами, такими как таламус и ствол мозга. Важно отметить, что она получает чрезвычайно плотные входные сигналы от нейромодуляторных центров ствола и переднего мозга, включая серотонинергические ядра шва. Серотонинсодержащие (5-гидрокситриптамин, 5-НТ) нейроны в дорсальном и срединном ядрах шва посылают аксоны в несколько субрегионов ПФК грызунов: поясную, прелимбическую и инфраламбическую кору. Прочные анатомические и функциональные взаимосвязи между ПФК и ядрами шва также позволяют предположить, что 5-НТ играет важную роль в регуляции исполнительной функции. Показано, что содержание 5-НТ в структурах ПФК имеет значимость в процессах формирования кратковременной памяти, внимания и когнитивной гибкости. Кроме того, уровни 5-НТ имеют решающее значение для поведенческого торможения, поскольку повышение или снижение уровня 5-НТ в ПФК сопровождается увеличением импульсивности [20].

При анализе данных содержания 5-НТ, его предшественников и метаболита – 5-гидроксииндолуксусной кислоты в ПФК у животных в возрасте 3 месяцев в условиях хронической экспозиции ЭМП Wi-Fi выявлено увеличение уровня Тгт на 12,0 % ($p = 0,04$) и его метаболита 5-НТ (на 6,0 %, при $p = 0,04$) – основного нейромедиатора серотонинергической системы в ПФК (табл. 2). Напротив, у животных экспериментальной группы в возрасте 6 и 9 месяцев имела

Т а б л и ц а 2. Содержание серотонина, его предшественников и метаболита 5-гидроксииндолуксусной кислоты в префронтальной коре головного мозга крыс-самцов в возрасте 3, 6 и 9 месяцев, подвергнутых хроническому воздействию ЭМП

T a b l e 2. The content of serotonin, its precursors and the metabolite 5-hydroxyindoleacetic acid in the of the prefrontal cortex of male rats aged 3, 6 and 9 months, subjected to chronic exposure to EMF

Экспериментальные группы Experimental groups	Исследуемый показатель The indicator under study			
	Трп, нмоль/г	5-НТР, нмоль/г	5-НТ, нмоль/г	5-НИАА, нмоль/г
<i>3 месяца</i>				
Контроль	23,52 (21,88; 24,61)	0,21 (0,2; 0,24)	11,77 (11,33; 14,77)	3,99 (3,72; 4,79)
Wi-Fi	26,35 (24,83; 27,26)	0,18 (0,18; 0,22)	12,48 (11,55; 14,13)	4,30 (3,87; 5,13)
<i>p</i>	0,04	0,34	0,04	0,40
<i>6 месяцев</i>				
Контроль	24,93 (24,18; 26,16)	0,25 (0,22; 0,30)	6,77 (6,12; 8,57)	2,66 (2,35; 2,88)
Wi-Fi	23,16 (21,02; 24,11)	0,24 (0,22; 0,25)	7,87 (6,53; 8,14)	2,73 (2,33; 3,31)
<i>p</i>	0,05	0,54	0,93	0,66
<i>9 месяцев</i>				
Контроль	25,00 (23,03; 28,57)	0,21 (0,19; 0,28)	15,55 (13,23; 18,15)	4,98 (4,59; 5,61)
Wi-Fi	22,55 (20,62; 25,13)	0,19 (0,16; 0,21)	14,87 (12,85; 15,30)	4,10 (3,86; 4,73)
<i>p</i>	0,09	0,31	0,39	0,06

П р и м е ч а н и я: *p* – уровень значимости различий к группе необлученных животных (тест Манна–Уитни); Трп – триптофан; 5-НТР – 5-гидрокситриптофан; 5-НТ – 5-гидрокситриптамин или серотонин; 5-НИАА – 5-гидроксииндолуксусная кислота.

N o t e s: *p* – level of significance of differences in the group of non-irradiated animals (Mann–Whitney test); Трп – tryptophan; 5-НТР – 5-hydroxytryptophan; 5-НТ – 5-hydroxytryptamine or serotonin; 5-НИАА – 5-hydroxyindoleacetic acid.

место тенденция снижения содержания Трп при относительно нормальном содержании его метаболитов – 5-НТР, 5-НТ и 5-НИАА.

Отсутствие значительных изменений в содержании 5-НТ и его метаболита в структурах ПФК головного мозга крыс-самцов на стадии раннего постнатального развития в условиях хронического влияния ЭМП устройства Wi-Fi позволяет предположить меньшую восприимчивость серотонинергической системы ПФК молодого организма к воздействию ЭМИ устройств подвижной сотовой связи. В сравнении с дофаминергическими системами ПФК, в которых выявлена ранняя тенденция к изменению содержания DA и повышенному его накоплению при взрослении, серотонинергическая система демонстрирует некоторые незначительные изменения в раннем возрасте, но относительно стабильный уровень 5-НТ в зрелом возрасте в условиях хронического воздействия низкоинтенсивного электромагнитного излучения.

Выявление критических структур организма к воздействию антропогенных факторов, в том числе электромагнитных полей, является одной из важнейших задач в области гигиенического нормирования уровня электромагнитных излучений. В связи с чем выявленные изменения в функционировании дофаминергической системы префронтальной коры головного мозга позволяют адекватно оценить действующие нормативы для ЭМИ устройств подвижной сотовой связи по предельным уровням, воздействующим на человека, что позволит минимизировать вклад данного типа воздействия в развитие заболеваний ЦНС, связанных с нарушением баланса моноаминов. Выявление механизмов, лежащих в основе пагубного влияния ЭМП дециметрового диапазона на живые системы, позволит более скрупулезно подойти к разработке рекомендаций по безопасному обращению с источниками ЭМИ в быту.

Полученные данные послужат научным обоснованием разработки гигиенических норм и адекватной оценки опасности ЭМИ диапазона радиочастот при их воздействии на человека с точки зрения биологической обоснованности. Исследования в данном направлении имеют важное, фундаментальное и прикладное значение и вносят существенный вклад в понимание механизмов негативного воздействия ЭМИ на живой организм, необходимости ограничений широкого использования беспроводных технологий информационного обслуживания населения с целью обеспечения их безопасности.

Заключение. Выявленные особенности изменения содержания дофамина, серотонина, их предшественников и производных в ПФК головного мозга у крыс при их взрослении в условиях хронического воздействия ЭМП устройства Wi-Fi (2,45 ГГц, ППЭ_{max} – 5,83 мкВт/см², ППЭ_χ – 0,46 ± 0,37 мкВт/см², 24 ч/день, 7 дней в неделю) указывают на более значимую реакцию, по сравнению с серотонинергической, дофаминергической системы ПФК головного мозга. Повышение уровня дофамина в ПФК в молодом возрасте в этих условиях может стать определяющим фактором возникновения ее дисфункции при взрослении, что может проявляться нарушениями поведения, ухудшением социальной адаптации и когнитивных способностей. К тому же выявленные особенности реакции дофаминергической системы ПФК развивающегося организма к ЭМИ устройств подвижной сотовой связи требует разработки новых подходов и уточнения гигиенических мер по минимизации длительного воздействия ЭМИ на организм, особенно на головной мозг.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Список использованных источников

1. Григорьев, Ю. Г. Значимость адекватной информации по оценке опасности ЭМП сотовой связи для здоровья населения (первая четверть XXI века) / Ю. Г. Григорьев // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2020. – Т. 60, № 5. – С. 532–540. <https://doi.org/10.31857/s0869803120050045>
2. Pall, M. L. Wi-Fi is an important threat to human health / M. L. Pall // Environmental Research. – 2018. – Vol. 164. – P. 405–416. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.01.035>
3. Kesari, K. K. Mutagenic response of 2.45 GHz radiation exposure on rat brain / K. K. Kesari, J. Behari, S. Kumar // Int. J. Radiat Biol. – 2010. – Vol. 86, N 4. – P. 334–343. <https://doi.org/10.3109/09553000903564059>
4. Hu, C. Effects of radiofrequency electromagnetic radiation on neurotransmitters in the brain / C. Hu, H. Zuo, Y. Li // Front. Public Health. – 2021. – Vol. 9. – Art. 691880. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2021.691880>
5. Possible effects of radiofrequency electromagnetic field exposure on central nerve system / Ju Hwan Kim [et al.] // Biomol. Ther. – 2019. – Vol. 27, N 3. – P. 265–275. <https://doi.org/10.4062/biomolther.2018.152>
6. Hossmann, K. A. Effects of electromagnetic radiation of mobile phones on the central nervous system / K. A. Hossmann, D. M. Hermann // Bioelectromagnetics. – 2003. – Vol. 24, N 1. – P. 49–62. <https://doi.org/10.1002/bem.10068>
7. Adair, E. R. Thermoregulatory responses to RF energy absorption / E. R. Adair, D. R. Black // Bioelectromagnetics. – 2003. – Vol. 24, N S6. – P. S17–S38. <https://doi.org/10.1002/bem.10133>
8. Lai, H. Microwave irradiation affects radial-arm maze performance in the rat / H. Lai, A. Horita, A. W. Guy // Bioelectromagnetics. – 1994. – Vol. 15, N 2. – P. 95–104. <https://doi.org/10.1002/bem.2250150202>
9. Systematic review on the health effects of exposure to radiofrequency electromagnetic fields from mobile phone base stations / M. Röösli [et al.] // Bull. World Health Organization. – 2010. – Vol. 88. – P. 887–896. <https://doi.org/10.2471/blt.09.071852>
10. Ashby, F. G. Differential effects of dopamine-directed treatments on cognition / F. G. Ashby, V. Valentin, S. von Meer // Neuropsychiatric Disease and Treatment. – 2015. – Vol. 2015, N 11. – P. 1859–1875. <https://doi.org/10.2147/ndt.s65875>
11. Ott, T. Dopamine and cognitive control in prefrontal cortex / T. Ott, A. Nieder // Trends in Cognitive Sciences. – 2019. – Vol. 23, N 3. – P. 213–234. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2018.12.006>
12. Крачун, Г. П. К проблеме организации психофизиологических механизмов деятельности эволюционно новых интегральных информационно-сетевых систем мозга: функциональная система префронтальной ассоциативной коры и ее роль в процессах социальной адаптации человека / Г. П. Крачун, Ю. И. Щерба // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5. – С. 514.
13. Structural variations in prefrontal cortex mediate the relationship between early childhood stress and spatial working memory / J. L. Hanson [et al.] // J. Neurosci. – 2012. – Vol. 32, N 23. – P. 7917–7925. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.0307-12.2012>
14. Jouvett, M. The role of monoamines and acetylcholine-containing neurons in the regulation of the sleep-waking cycle / M. Jouvett // Neurophysiology and Neurochemistry of Sleep and Wakefulness. – Berlin, Heidelberg, 2010. – P. 166–307. https://doi.org/10.1007/3-540-05462-6_2

15. Дорошенко, Е. М. Биогенные моноамины, их предшественники и метаболиты в мозге крыс при экспериментальной недостаточности кровообращения / Е. М. Дорошенко, В. В. Лелевич // *Нейрохимия*. – 2020. – Т. 37, № 3. – С. 240–248. <https://doi.org/10.31857/s1027813320030036>
16. Meiser, J. Complexity of dopamine metabolism / J. Meiser, D. Weindl, K. Hiller // *Cell Communication and Signaling*. – 2013. – Vol. 11. – Art. 34. <https://doi.org/10.1186/1478-811x-11-34>
17. Goto, Y. Functional and dysfunctional synaptic plasticity in prefrontal cortex: roles in psychiatric disorders / Y. Goto, C. R. Yang, S. Otani // *Biological Psychiatry*. – 2010. – Vol. 67, N 3. – P. 199–207. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2009.08.026>
18. Carlén, M. What constitutes the prefrontal cortex? / M. Carlén // *Science*. – 2017. – Vol. 358, N 6362. – P. 478–482. <https://doi.org/10.1126/science.aan8868>
19. The dual role of dopamine in the modulation of information processing in the prefrontal cortex underlying social behavior / H. Sotoyama [et al.] // *FASEB Journal*. – 2022. – Vol. 36. – Art. 22160. <https://doi.org/10.1096/fj.202101637r>
20. Puig, M. V. Serotonin and prefrontal cortex function: neurons, networks, and circuits / M. V. Puig, A. T. Gullledge // *Molecular Neurobiology*. – 2011. – Vol. 44. – P. 449–464. <https://doi.org/10.1007/s12035-011-8214-0>

References

1. Grigoriev Yu. G. Significance of adequate information about the danger of cellular connection for health of population in the XXI century. *Radiacionnaya biologiya. Radioekologiya = Radiation biology. Radioecology*, 2020, vol. 60, no. 5, pp. 532–540 (in Russian). <https://doi.org/10.31857/s0869803120050045>
2. Pall M. L. Wi-Fi is an important threat to human health. *Environmental Research*, 2018, vol. 164, pp. 405–416. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.01.035>
3. Kesari K. K., Behari J., Kumar S. Mutagenic response of 2.45 GHz radiation exposure on rat brain. *International Journal of Radiation Biology*, 2010, vol. 86, no. 4, pp. 334–343. <https://doi.org/10.3109/09553000903564059>
4. Hu C., Zuo H., Li Y. Effects of radiofrequency electromagnetic radiation on neurotransmitters in the brain. *Frontiers in Public Health*, 2021, vol. 9, art. 691880. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2021.691880>
5. Kim J. H., Lee J. K., Kim H. G., Kim K. B., Kim H. R. Possible effects of radiofrequency electromagnetic field exposure on central nerve system. *Biomolecules and Therapeutics*, 2019, vol. 27, no. 3, pp. 265–275. <https://doi.org/10.4062/biomolther.2018.152>
6. Hossmann K. A., Hermann D. M. Effects of electromagnetic radiation of mobile phones on the central nervous system. *Bioelectromagnetics*, 2003, vol. 24, no. 1, pp. 49–62. <https://doi.org/10.1002/bem.10068>
7. Adair E. R., Black D. R. Thermoregulatory responses to RF energy absorption. *Bioelectromagnetics*, 2003, vol. 24, no. S6, pp. S17–S38. <https://doi.org/10.1002/bem.10133>
8. Lai H., Horita A., Guy A. W. Microwave irradiation affects radial-arm maze performance in the rat. *Bioelectromagnetics*, 1994, vol. 15, no. 2, pp. 95–104. <https://doi.org/10.1002/bem.2250150202>
9. Röösli M., Frei P., Mohler E., Hug K. Systematic review on the health effects of exposure to radiofrequency electromagnetic fields from mobile phone base stations. *Bulletin of the World Health Organization*, 2010, vol. 88, pp. 887–896. <https://doi.org/10.2471/blt.09.071852>
10. Ashby F. G., Valentin V., von Meer S. Differential effects of dopamine-directed treatments on cognition. *Neuropsychiatric Disease and Treatment*, 2015, vol. 2015, no. 11, pp. 1859–1875. <https://doi.org/10.2147/ndt.s65875>
11. Ott T., Nieder A. Dopamine and cognitive control in prefrontal cortex. *Trends in Cognitive Sciences*, 2019, vol. 23, no. 3, pp. 213–234. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2018.12.006>
12. Krachun G. P., Scherba Yu. I. To the problem of psycho-physiological mechanisms of the evolutionary new integrated information network systems of the brain: a functional system prefrontal association cortex and its role in processes of social adaptation of the person. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya = Modern Problems of Science and Education*, 2014, no. 5, pp. 514 (in Russian).
13. Hanson J. L., Chung M. K., Avants B. B., Rudolph K. D., Shirtcliff E. A., Gee J. C., Davidson R. J., Pollak S. D. Structural variations in prefrontal cortex mediate the relationship between early childhood stress and spatial working memory. *Journal of Neuroscience*, 2012, vol. 32, no. 23, pp. 7917–7925. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.0307-12.2012>
14. Jouvet M. The role of monoamines and acetylcholine-containing neurons in the regulation of the sleep-waking cycle. *Neurophysiology and Neurochemistry of Sleep and Wakefulness*. Berlin, Heidelberg, 2010, pp. 166–307. https://doi.org/10.1007/3-540-05462-6_2
15. Doroshenko E. M., Lelevich V. V. Biogenic monoamines, their precursors, and metabolites in the brain of rats with experimental circulatory failure. *Nejrohimiya = Neurochemistry*, 2020, vol. 37, no. 3, pp. 240–248 (in Russian). <https://doi.org/10.31857/s1027813320030036>
16. Meiser J., Weindl D., Hiller K. Complexity of dopamine metabolism. *Cell Communication and Signaling*, 2013, vol. 11, art. 34. <https://doi.org/10.1186/1478-811x-11-34>
17. Goto Y., Yang C. R., Otani S. Functional and dysfunctional synaptic plasticity in prefrontal cortex: roles in psychiatric disorders. *Biological Psychiatry*, 2010, vol. 67, no. 3, pp. 199–207. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2009.08.026>
18. Carlén M. What constitutes the prefrontal cortex? *Science*, 2017, vol. 358, no. 6362, pp. 478–482. <https://doi.org/10.1126/science.aan8868>
19. Sotoyama H., Inaba H., Iwakura Y., Namba H., Takei N., Sasaoka T., Nawa H. The dual role of dopamine in the modulation of information processing in the prefrontal cortex underlying social behavior. *FASEB Journal*, 2022, vol. 36, art. 22160. <https://doi.org/10.1096/fj.202101637r>
20. Puig M. V., Gullledge A. T. Serotonin and prefrontal cortex function: neurons, networks, and circuits. *Molecular Neurobiology*, 2011, vol. 44, pp. 449–464. <https://doi.org/10.1007/s12035-011-8214-0>

Информация об авторах

Чуешова Наталья Владимировна – канд. биол. наук, заведующий лабораторией. Институт радиобиологии НАН Беларуси (ул. Федюнинского, 4, 246007, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: natalya-chueshova@tut.by. ORCID: 0000-0002-4854-1717.

Щемелев Владислав Михайлович – мл. науч. сотрудник. Институт радиобиологии НАН Беларуси (ул. Федюнинского, 4, 246007, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: shemelev_vlad@mail.ru. ORCID: 0000-0002-5552-0965.

Висмонт Франтишек Иванович – член-корреспондент, д-р мед. наук, профессор, заведующий кафедрой. Белорусский государственный медицинский университет (пр-т Дзержинского, 83, 220083, Минск, Республика Беларусь). E-mail: patfiz@bsmu.by.

Чешик Игорь Анатольевич – канд. мед. наук, доцент, директор. Институт радиобиологии НАН Беларуси (ул. Федюнинского, 4, 246007, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: irb@irb.basnet.by. ORCID: 0000-0003-4436-9371.

Information about the authors

Chueshova Natalya V. – Ph. D. (Biology), Head of the Laboratory. Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus (4, Fedyninski Str., 246007, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: natalya-chueshova@tut.by. ORCID: 0000-0002-4854-1717.

Schemelev Vladislav M. – Junior Researcher. Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus (4, Fedyninski Str., 246007, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: shemelev_vlad@mail.ru. ORCID: 0000-0002-5552-0965.

Vismont Frantisek I. – Corresponding Member, D. Sc. (Medicine), Professor, Head of the Department. Belarusian State Medical University (83, Dzerzhinski Ave., 220083, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: patfiz@bsmu.by. ORCID: 0000-0002-4613-6494.

Cheshyk Ihar A. – Ph. D. (Medicine), Associate Professor, Director. Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus (4, Fedyninski Str., 246007, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: irb@irb.basnet.by. ORCID: 0000-0003-4436-9371.

ISSN 1561-8323 (Print)

ISSN 2524-2431 (Online)

УДК 582.632.1+630*81:[581.81:581.165.73]

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2024-68-5-390-394>

Поступило в редакцию 14.08.2024

Received 14.08.2024

С. В. Пантелеев¹, Л. В. Ветчинникова², член-корреспондент РАН А. Ф. Титов³,
П. С. Кирьянов¹, член-корреспондент НАН Беларуси О. Ю. Баранов⁴

¹Институт леса Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Республика Беларусь

²Институт леса Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр
Российской академии наук», Петрозаводск, Российская Федерация

³Институт биологии Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр
Российской академии наук», Петрозаводск, Российская Федерация

⁴Национальная академия наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

МОЛЕКУЛЯРНО-ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТКАНЕЙ ДРЕВЕСИНЫ И КОРЫ ПРИВИВОК РАЗНЫХ ВИДОВ БЕРЕЗ

Аннотация. С использованием семи микросателлитных маркеров проведен молекулярно-генетический анализ полученных в результате прививки копулировкой или кольцевой локальной трансплантации коры фрагментов тканей ствола карельской березы и березы повислой. Установлено, что независимо от способа прививки каждый из компонентов после срастания тканей устойчиво сохраняет свой генотип. Показано, что при кольцевой трансплантации, когда «перерезаются» все нисходящие и восходящие транспортные потоки по окружности ствола вдоль его оси, в местах срастания тканей коры и древесины могут формироваться aberrантные клетки. Но и в этом случае карельская береза и береза повислая сохраняют свои не только фенотипические (узорчатая и прямолинейная текстура древесины соответственно), но и генотипические особенности (что выражается в сохранении сочетания выявленных аллельных вариантов).

Ключевые слова: SSR-маркеры, карельская береза, *Betula pendula* Roth var. *carelica* (Mercklin) Hämet-Ahti, береза повислая, *Betula pendula* Roth, прививка, трансплантация тканей, узорчатая древесина, генотипы

Для цитирования. Молекулярно-генетический анализ тканей древесины и коры прививок разных видов берез / С. В. Пантелеев [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2024. – Т. 68, № 5. – С. 390–394. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2024-68-5-390-394>

Stanislav V. Panteleev¹, Lidiya V. Vetchinnikova², Corresponding Member RAS Alexander F. Titov³,
Pavel S. Kiryanov¹, Corresponding Member of the NAS of Belarus Oleg Yu. Baranov⁴

¹Forest Research Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Republic of Belarus

²Forest Research Institute of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences,
Petrozavodsk, Russian Federation

³Institute of Biology of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russian Federation

⁴National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

MOLECULAR GENETIC ANALYSIS OF WOOD AND BARK TISSUE VACCINATIONS OF DIFFERENT-TYPE BIRCH

Abstract. Seven microsatellite markers were used in molecular genetic analysis of curly birch and silver birch trunk tissue fragments produced through whip grafting or bark ring transplantation. The analysis showed that whichever grafting method was used, each component steadily retained their genotype upon tissue fusion. It is demonstrated that aberrant cells may be formed at the point of bark and trunk tissue fusion after donor bark ring transplantation, when all the ascending and descending transport pathways along the recipient's trunk axis have been severed all around the trunk circumference. Even then, however, both curly birch and silver birch retain their phenotypic (figured and straight wood grain, respectively) as well as genotypic (which is expressed in preserving a combination of identified allelic variants) traits.

Keywords: locus SSR markers, curly birch, *Betula pendula* Roth var. *carelica* (Mercklin) Hämet-Ahti, silver birch, *Betula pendula* Roth, grafting, tissue transplantation, figured wood, genotypes

For citation. Panteleev S. V., Vetchinnikova L. V., Titov A. F., Kiryanov P. S., Baranov O. Yu. Molecular genetic analysis of wood and bark tissue vaccinations of different-type birch. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2024, vol. 68, no. 5, pp. 390–394 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2024-68-5-390-394>

Введение. Текстура и окраска древесины являются основными характеристиками, определяющими ее декоративные достоинства. Среди представителей европейской лесной дендрофлоры наиболее широкую известность получила высокоценная узорчатая древесина карельской березы (*Betula pendula* Roth var. *carelica* (Mercklin) Hämet-Ahti), причины появления узорчатости по-прежнему остаются предметом дискуссии. В этом плане новые возможности открывает применение современных молекулярно-генетических методов исследования. Так, недавно появился ряд публикаций, в которых рассматривается роль апопластного транспорта сахарозы в формировании узорчатой древесины, связанная с экспрессией генов семейств *SUT* и *SWEET* (кодирующих транспортеры сахарозы) [1], а также *CWINV* и *SUS* (кодирующих ферменты, расщепляющие сахарозу), и генов, кодирующих белок CVIF (отвечает за посттрансляционную регуляцию активности инвертазы клеточной стенки) [2]. В то же время результаты, полученные ранее в опытах с прививками и трансплантацией тканей [3], говорят о том, что накопление в стволе транспортной сахарозы является только следствием образования узорчатой древесины, а не ее причиной, поскольку органично сросшиеся ткани карельской березы и березы повислой (или березы пушистой) устойчиво сохраняют свои особенности, хотя и образуют общую проводящую систему, обеспечивающую единый транспортный поток продуктов фотосинтеза [4]. Это согласуется и с мнением Ю. В. Гамалея [5], который указывал, что успешность срастания прививаемых компонентов зависит в большей степени от сходства флоэмных эксудатов, чем от родственных связей растений.

Цель данной работы состояла в проведении молекулярно-генетического исследования (с использованием семи микросателлитных маркеров) тканей древесины и коры, полученных в результате прививки копулировкой и кольцевой (локальной) трансплантации фрагментов коры (как одной из разновидностей прививки) карельской березы на стволы березы повислой.

Материалы и методы исследования. Объектами изучения были карельская береза (*Betula pendula* Roth var. *carelica* (Mercklin) Hämet-Ahti) и береза повислая (*Betula pendula* Roth). Материалом для исследований служили ткани древесины и коры, полученные в результате прививки копулировкой и кольцевой (локальной) трансплантации коры (как разновидности прививки), где в качестве привоя (донора) выступала карельская береза, а подвоя (или реципиента) – береза повислая. Выделение ДНК из тканей древесины и коры (18 образцов) осуществляли по методике, описанной ранее [6]. Для генотипирования использовали анализ полиморфизма микросателлитных локусов, локализованных в клеточном ядре (nSSRP). В качестве маркеров применялись полиморфные SSR-локусы, наиболее часто используемые для разных видов березы – L2.2, L1.10, L7.8, L10.1, L022, L7.3, L5.4 [7]. Выбор данных маркеров был также обусловлен их высоким уровнем изменчивости (на основании предварительного анализа показателей полиморфизма: числа аллелей на локус (5–12), наблюдаемой и ожидаемой гетерозиготности (0,40–0,90)). Прямой праймер для каждого из маркеров на 5'-конце был мечен одним из типов красителей – 6FAM, TAMRA, HEX.

Полимеразную цепную реакцию (ПЦР) проводили с использованием коммерческой смеси Fermentas, содержащей TaqHF ДНК-полимеразу согласно инструкции фирмы-изготовителя (Thermo Fisher Scientific/Fermentas, Литва). Электрофоретическое фракционирование ампликонов SSR-маркеров проводили с помощью генетического анализатора ABI Prism 310 Genetic Analyzer в соответствии с инструкцией фирмы-производителя (Thermo Fisher Scientific, США). Для оценки данных электрофоретического фракционирования, расчета уровня миксоплоидии и определения микросателлитной нестабильности использовали программу GeneMapper 4.0 (Thermo Fisher Scientific, США).

Результаты и их обсуждение. Проведенное исследование показало, что после выполнения прививки путем копулировки и привой, и подвой сохраняли свои генотипические характеристики. При этом электрофоретические спектры древесины, полученные на основе SSR-маркеров, демонстрируют наличие у них одного или двух пиков. Это говорит о том, что как привой, так и подвой являются диплоидами. Однако наличие одного пика свидетельствует, что генотип является гомозиготным по конкретному локусу, а двух – гетерозиготным. В частности, по локусу L1.10 привой (карельская береза) оказался гомозиготным (188 п. н.) (рис. 1, а), а подвой (береза повислая) – гетерозиготным (185/190 п. н.) (рис. 1, б).

В то же время обнаружено, что ткани древесины подвой (березы повислой) имеют некоторые генетические особенности, которые отразились в аллельном дисбалансе, в частности по локусу L2.2, и в значительном количестве минорных фракций с неустановленной детерминацией по

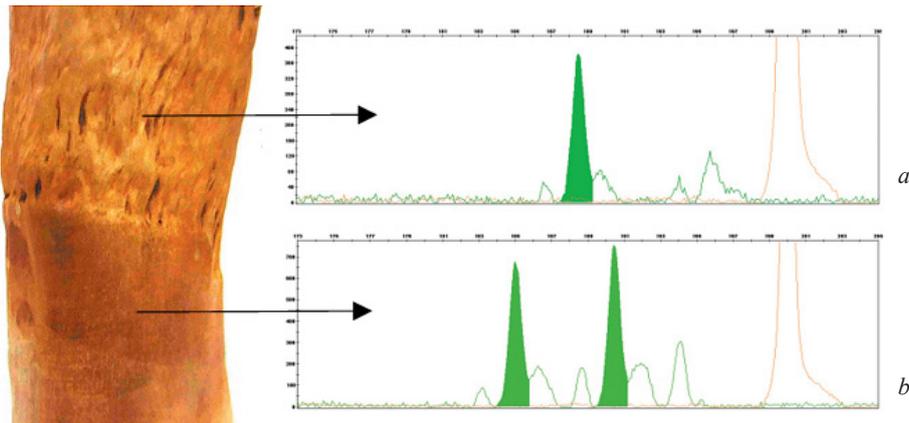


Рис. 1. SSR-спектры по маркеру L1.10 тканей древесины прививки (дерево ПТ-982), выполненной путем копулировки, компонентами которой являются карельская береза – привой (*a*) и береза повислая – подвой (*b*)

Fig. 1. SSR spectra of the marker locus L1.10 of whip-grafted wood tissues (tree PT-982) produced from curly birch as scion (*a*) and silver birch as stock (*b*)

локусу L10.1. Однако генетический химеризм тканей не диагностировался, поскольку характер минорных спектров по локусам L7.3, L10.1, L022 был сходным с подвоем или привоем, а по L2.2, L1.10, L5.4 и L7.8 они не выявлялись.

Молекулярно-генетический анализ компонентов древесины и коры, сформированных в результате кольцевой (в виде пояса) трансплантации тканей коры донора (карельская береза) (рис. 2, *a*), когда были «перерезаны» транспортные пути как нисходящего тока от кроны реципиента (береза повислая) к его собственной корневой системе, так и восходящего (от корневой системы к кроне), показал, что в процессе регенерации тканей участвовали и донор, и реципиент. Однако зона влияния каждого из них была строго локализована [7]. Так, все ткани реципиента (внутреннее кольцо древесины, сформированное до начала трансплантации; сектор, вновь образованный в области соединения (стыка) краевых поверхностей тканей реципиента и донора; а также ниже места кольцевой пересадки) независимо от их типа (кора или древесина) оказались генетически идентичными по плоидности и основному спектру аллелей по изученным локусам. Ткани коры и древесины донора также оказались диплоидными и генетически идентичными по

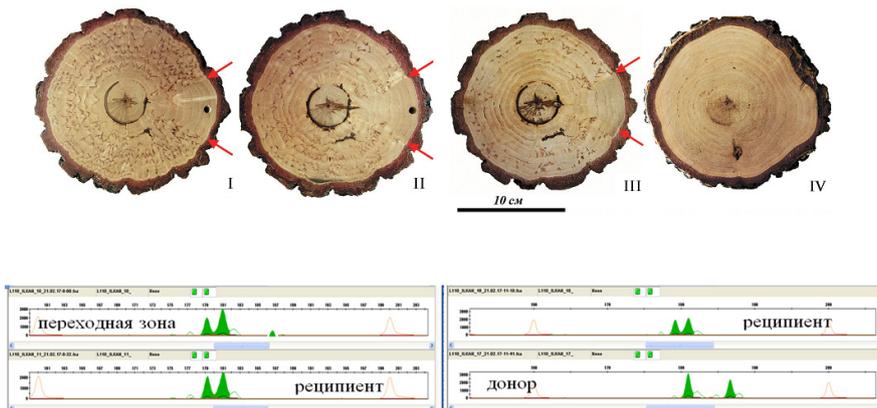


Рис. 2. Поперечные спилы участка ствола после кольцевой пересадки (в виде пояса), сделанные послойно, отражающие изменение текстуры древесины, начиная со средней части (I–III) места трансплантации коры донора (карельской березы) и по мере удаления ее в сторону реципиента (березы повислой) (IV). Стрелками указаны краевые точки соединения древесины донора и реципиента, образовавшейся (в виде сектора) по мере увеличения диаметра ствола (*a*), и отдельные SSR-спектры по маркеру L1.10 (*b*)

Fig. 2. Wood texture in layer-by-layer sections across the middle part (I) of the donor (curly birch) transplant and its alteration (II, III) towards the wood of the recipient (IV) (silver birch). Arrows point to the ends of the union between donor wood and recipient wood formed (as a sector) as the trunk diameter increased (*a*) and to individual L1.10 marker SSR spectra (*b*)

составу аллелей, но заметно отличались от реципиента, при этом узорчатая текстура, характерная для карельской березы, хорошо контрастировала с обычной (прямоволокнистой) древесиной березы повислой после их срастания.

Наряду с этим, в пограничных зонах срастания краевых тканей разных генотипов выявлен генетический химеризм, который проявлялся наличием сходных аллелей (генотипов), присутствующих обоим компонентам. Среди генетических особенностей реципиента также можно отметить микросателлитную нестабильность, которая проявлялась в тканях исходной древесины, образованной в центре ствола, в виде дополнительных атипичных (с редуцированным мотивом в составе повторяющейся ДНК) аллеломорфов в SSR-спектрах.

Анализ уровня миксоплоидии (процент клеток с числом хромосом, отклоняющимся от модального) тканей донора и реципиента (рис. 3) показал, что в ряде случаев данный показатель превышает норму (3–20 %), установленную для соматических клеток покрытосеменных древесных растений [8]. При этом доля гетероплоидных клеток в тканях древесины и коры в «зоне срастания» компонентов на поперечном сечении варьировала от средних до высоких значений (дисбаланс аллелей в различных хромосомах варьировал от 22,2 до 78,6 %), что, возможно, связано с утратой одной из хромосом. Аналогичная ситуация отмечена и для образцов коры реципиента, расположенной в «секторе срастания» генетически разнородных тканей. Возможно, такого рода изменения обусловлены некоторым отставанием процесса восстановления ксилемы (по сравнению с флоэмой) при кольцевой трансплантации по сравнению с тем, как это происходит при классической прививке, когда один из компонентов имеет корневую систему, а другой – побеги, ассимилирующая поверхность которых достаточна для выживания.

Заключение. В целом на основании полученных данных и их анализа установлено, что компоненты прививки, независимо от метода их получения (копулировкой или кольцевой трансплантацией в виде пояса), после срастания сохраняют не только свои фенотипические, но и генотипические особенности. Генетический химеризм диагностировали при кольцевой трансплантации, но исключительно в зонах срастания краевых компонентов донора и реципиента. Это говорит о том, что механизм распознавания генотипов скорее всего включается до начала функционирования вновь образованной сосудистой системы. Полученные результаты являются важными для понимания природы формирования и наследования узорчатой текстуры древесины, которая характерна для карельской березы и по сути является ее важнейшей отличительной чертой.

Благодарности. Анализ данных выполнен при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-16-00096), экспериментальные исследования – при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № Б17-63).

Acknowledgements. The data analysis was funded from the Russian Science Foundation (project no. 22-16-00096), and experimental studies were supported from Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (project no. Б17-63).

Список использованных источников

1. Disruption of long-distance transport leads to changes in gene expression profiles of sugar transporters in silver birch / Y. L. Moshchenskaya [et al.] // Russian Journal of Plant Physiology. – 2024. – Vol. 71. – Art. 72. <https://doi.org/10.1134/S1021443724604944>
2. Participation of *CWINV* and *SUS* genes in sucrose utilization in the disruption of cambium derivatives differentiation of silver birch / Y. L. Moshchenskaya [et al.] // Protein & Peptide Letters. – 2024. – Vol. 31, N 6. – P. 479–489. <https://doi.org/10.2174/0109298665309207240621094227>
3. Ермаков, В. И. Внутри- и межвидовая трансплантация коры березы и ее регенерация при повреждении / В. И. Ермаков, Л. Л. Новицкая, Л. В. Ветчинникова. – Петрозаводск, 1991. – 184 с.
4. Ветчинникова, Л. В. Карельская береза: важнейшие результаты и перспективы исследований / Л. В. Ветчинникова, А. Ф. Титов. – Петрозаводск, 2021. – 243 с.

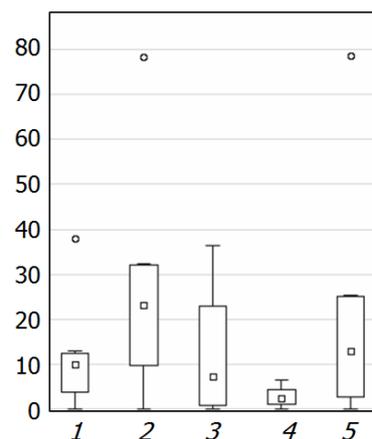


Рис. 3. Уровень миксоплоидии тканей на основании расчета данных потери гетерозиготности по маркерам у донора (карельская береза, КБ-135): 1 – L.1.10, 2 – L.5.4, 3 – L.7.3 и у реципиента (береза повислая, ББ-234): 4 – L.1.10 и 5 – L.7.8

Fig. 3. Tissue mixoploidy calculated from the loss of marker heterozygosity in the donor (curly birch, КБ-135): 1 – L.1.10, 2 – L.5.4, 3 – L.7.3 and in the recipient (silver birch, ББ-234): 4 – L.1.10 and 5 – L.7.8

5. Гамалей, Ю. В. Транспортная система сосудистых растений: происхождение, структура, функции, развитие, анализ разнообразия типов по таксономическим и эколого-географическим группам растений, эволюция и экологическая специализация транспортной системы / Ю. В. Гамалей. – СПб., 2004. – 424 с.

6. Падутов, В. Е. Методы молекулярно-генетического анализа / В. Е. Падутов, О. Ю. Баранов, Е. В. Воропаев. – Минск, 2007. – 176 с.

7. Kulju, K. K. M. Twenty-three microsatellite primer pairs for *Betula pendula* (Betulaceae) / K. K. M. Kulju, M. Pekkinen, S. Varvio // *Molecular Ecology Notes*. – 2004. – Vol. 4, N 3. – P. 471–473. <https://doi.org/10.1111/j.1471-8286.2004.00704.x>

8. Машкина, О. С. Длительное культивирование в условиях *in vitro* как один из способов сохранения представителей ценного генофонда карельской березы / О. С. Машкина, Т. М. Табацкая // *Достижения и проблемы лесной генетики и селекции: к 40-летию НИИЛГиС*. – Воронеж, 2010. – С. 30–51.

References

1. Moshchenskaya Y. L., Galibina N. A., Tarelkina T. V., Nikerova K. M., Serkova A. A., Korzhenevskiy M. A., Klimova A. V., Sofronova I. N., Semenova L. I. Disruption of long-distance transport leads to changes in gene expression profiles of sugar transporters in silver birch. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2024, vol. 71, art. 72. <https://doi.org/10.1134/s1021443724604944>

2. Moshchenskaya Y. L., Galibina N. A., Serkova A. A., Tarelkina T. V., Nikerova K. M., Korzhenevskiy M. A., Sofronova I. N., Semenova L. I. Participation of *CWINV* and *SUS* genes in sucrose utilization in the disruption of cambium derivatives differentiation of silver birch. *Protein & Peptide Letters*, 2024, vol. 31, no. 6, p. 479–489. <https://doi.org/10.2174/0109298665309207240621094227>

3. Ermakov V. I., Novitskaya L. L., Vetchinnikova L. V. *Intra- and interspecific transplantation of birch bark it's regeneration when damages*. Petrozavodsk, 1991. 184 p. (in Russian).

4. Vetchinnikova L. V., Titov A. F. *Curly birch: the most important research results and prospects*. Petrozavodsk, 2021. 243 p. (in Russian).

5. Gamalei Yu. V. *Transport system of vascular plants: origin, structure, functions, development, analysis of type diversity along the taxonomical and eco-geographical groups of plants, evolution and ecological specialization of transport system*. Saint-Petersburg, 2004. 424 p. (in Russian).

6. Padutov V. E., Baranov O. Yu., Voropaev E. V. *Methods of molecular genetic analysis*. Minsk, 2007. 176 p. (in Russian).

7. Kulju K. K. M., Pekkinen M., Varvio S. Twenty-three microsatellite primer pairs for *Betula pendula* (Betulaceae). *Molecular Ecology Notes*, 2004, vol. 4, no. 3, pp. 471–473. <https://doi.org/10.1111/j.1471-8286.2004.00704.x>

8. Mashkina O. S., Tabatskaya T. M. Long-term cultivation *in vitro* as one of the ways to preserve representatives of the valuable gene pool of Curly birch. *Dostizheniya i problemy lesnoi genetiki i seleksii: k 40-letiyu NIILGiS* [Achievements and problems of forest genetics and breeding: to the 40th anniversary of NIILGiS]. Voronezh, 2010, pp. 30–51 (in Russian).

Информация об авторах

Пантелеев Станислав Викторович – канд. биол. наук, доцент, заведующий лабораторией. Институт леса НАН Беларуси (ул. Пролетарская, 71, 246050, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: stasikdesu@mail.ru. ORCID: 0009-0007-6010-8186.

Ветчинникова Лидия Васильевна – д-р биол. наук, профессор, гл. науч. сотрудник. Институт леса Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук» (ул. Пушкинская, 11, 185910, Петрозаводск, Российская Федерация). E-mail: vetchin@krc.karelia.ru. ORCID: 0000-0003-2091-905X.

Титов Александр Федорович – член-корреспондент РАН, д-р биол. наук, профессор, гл. науч. сотрудник, руководитель лаборатории. Институт биологии Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук» (ул. Пушкинская, 11, 185910, Петрозаводск, Российская Федерация). E-mail: titov@krc.karelia.ru. ORCID: 0000-0001-6880-2411.

Кирьянов Павел Сергеевич – науч. сотрудник. Институт леса НАН Беларуси (ул. Пролетарская, 71, 246050, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: PKirjanov@yandex.ru. ORCID: 0000-0002-6224-9771.

Баранов Олег Юрьевич – член-корреспондент, д-р биол. наук, профессор, академик-секретарь. Национальная академия наук Беларуси (пр-т Независимости, 66, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: betula-belarus@mail.ru. ORCID: 0000-0002-0665-0093.

Information about the authors

Pantelev Stanislav V. – Ph. D. (Biology), Associate Professor, Head of the Laboratory. Forest Research Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (71, Proletarskaya Str., 246050, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: stasikdesu@mail.ru. ORCID: 0009-0007-6010-8186.

Vetchinnikova Lidiya V. – D. Sc. (Biology), Professor, Chief Researcher. Forest Research Institute of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences (11, Pushkinskaya Str., 185910, Petrozavodsk, Russian Federation). E-mail: vetchin@krc.karelia.ru. ORCID: 0000-0003-2091-905X.

Titov Alexander F. – Corresponding Member of the RAS, D. Sc. (Biology), Professor, Chief Researcher, Head of the Laboratory. Institute of Biology of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences (11, Pushkinskaya Str., 185910, Petrozavodsk, Russian Federation). E-mail: titov@krc.karelia.ru. ORCID: 0000-0001-6880-2411.

Kiryanov Pavel S. – Researcher. Forest Research Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (71, Proletarskaya Str., 246050, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: PKirjanov@yandex.ru. ORCID: 0000-0002-6224-9771.

Baranov Oleg Yu. – Corresponding Member, D. Sc. (Biology), Professor, Academic-Secretary. National Academy of Sciences of Belarus (66, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: betula-belarus@mail.ru. ORCID: 0000-0002-0665-0093.

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

МЕДИЦИНА
MEDICINE

УДК [616.441+616.379-008.64]-053.2-097.1:575.174.015.3
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2024-68-5-395-403>

Поступило в редакцию 05.09.2024
Received 05.09.2024

Н. В. Волкова^{1,2}, Е. А. Аксёнова, А. А. Яцкив³, А. В. Солнцева^{1,4}, Р. И. Гончарова³

¹Белорусский государственный медицинский университет, Минск, Республика Беларусь

²2-я городская детская клиническая больница, Минск, Республика Беларусь

³Институт генетики и цитологии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

⁴Республиканский научно-практический центр детской онкологии, гематологии и иммунологии,
Боровляны, Республика Беларусь

**АССОЦИАЦИЯ ГЕНОВ HLA II КЛАССА С АУТОИММУННЫМИ ЗАБОЛЕВАНИЯМИ
ЩИТОВИДНОЙ ЖЕЛЕЗЫ У ДЕТЕЙ С САХАРНЫМ ДИАБЕТОМ 1 ТИПА**

(Представлено академиком А. В. Кильчевским)

Аннотация. Гены человеческого лейкоцитарного антигена (HLA) II класса являются одним из важнейших факторов, влияющих на вероятность возникновения наиболее распространенных аутоиммунных заболеваний, включая сахарный диабет (СД) 1 типа и аутоиммунные тиреоидные заболевания (АИТЗ). Учитывая высокую вариабельность генов HLA и специфичность их аллельных спектров для разных популяций, представляло интерес провести HLA-типирование детей с изолированным СД 1 типа и в сочетании с АИТЗ (аутоиммунным полигландулярным синдромом 3а типа – АПС 3а типа) для установления аллелей, ассоциированных с предрасположенностью к развитию АИТЗ у детей с СД 1 типа в Беларуси. Определен спектр аллелей по 3 генам HLA-комплекса II класса (*DRB1*, *DQB1*, *DQA1*) у 49 детей с АПС 3а типа, 95 детей с СД 1 типа методом SBT (Sequence-Based Typing) и у 24 детей контрольной группы с помощью высокопроизводительного секвенирования нового поколения (Illumina). Выявлен ряд аллелей и гаплотипов *DRB1*, *DQB1*, *DQA1*, ассоциированных с предрасположенностью или резистентностью к обеим рассматриваемым формам аутоиммунной патологии (СД 1 типа и АПС 3а типа) у здорового детского контингента. Полученные данные свидетельствуют о наличии в белорусской популяции общего спектра полиморфных вариантов генов HLA II класса, вовлеченных в этиопатогенез СД 1 типа и АПС 3а типа. Вместе с тем у детей с АПС 3а типа обнаружена более высокая суммарная частота определенных подтипов аллеля *HLA-DRB1*04* и одной из разновидностей гаплотипа *DRB4-DQ4.3* по сравнению со сверстниками с изолированным СД 1 типа. Эти выявленные генетические маркеры могут быть использованы для выделения групп высокого риска развития АИТЗ у детей с СД 1 типа в белорусской популяции.

Ключевые слова: аутоиммунные заболевания щитовидной железы, сахарный диабет 1 типа, аутоиммунный полигландулярный синдром 3а типа, гены человеческого лейкоцитарного антигена, генетический полиморфизм

Для цитирования. Ассоциация генов HLA II класса с аутоиммунными заболеваниями щитовидной железы у детей с сахарным диабетом 1 типа / Н. В. Волкова [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2024. – Т. 68, № 5. – С. 395–403. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2024-68-5-395-403>

Natalya V. Volkova^{1,2}, Elena A. Aksenova, Hanna A. Yatskiu³, Angelika V. Solntseva^{1,4}, Roza I. Goncharova³

¹Belarusian State Medical University, Minsk, Republic of Belarus

²2nd City Children's Clinical Hospital, Minsk, Republic of Belarus

³Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

⁴Republican Scientific and Practical Center for Pediatric Oncology, Hematology and Immunology,
Borovlyany, Republic of Belarus

**ASSOCIATION OF HLA CLASS II GENES WITH AUTOIMMUNE THYROID DISEASES IN CHILDREN
WITH TYPE 1 DIABETES**

(Communicated by Academician Aleksandr V. Kilchevsky)

Abstract. Human leukocyte antigen (HLA) class II genes are one of the main genetic susceptibility factors of the most common autoimmune diseases, including type 1 diabetes mellitus (T1D) and autoimmune thyroid diseases (AITD). Distinct HLA alleles are associated with autoimmune endocrinopathies in different populations. This work was aimed to reveal the

alleles associated with a predisposition to AITD in children with T1D in Belarus. 49 patients with a combination of T1D and AITD (autoimmune polyglandular syndrome type 3a – APS type 3a), 95 patients with T1D and 24 healthy controls were included into the study. HLA typing for 3 genes (*DRBI*, *DQBI*, *DQAI*) was performed by SBT (sequence-based typing) in the children with T1D and APS type 3a and by high-performance sequencing of a new generation (Illumina) in the children of the control group. We identified a number of alleles and haplotypes *DRBI*, *DQBI*, *DQAI* associated with a predisposition or resistance to both forms of autoimmune pathology (T1D and APS type 3a) in healthy children. These data indicate a common spectrum of polymorphic variants of HLA class II genes involved in the etiopathogenesis of T1D and APS type 3 in the Belarusian population. At the same time, the children with type 3a APS had a higher total frequency of certain *HLA-DRBI*04* allele subtypes and one of the variants of the *DRB4-DQ4.3* haplotype, compared with the patients with isolated T1D. These revealed genetic markers can be used to identify high-risk groups of AITD in children with T1D in the Belarusian population.

Keywords: autoimmune thyroid diseases, type 1 diabetes, autoimmune polyglandular syndrome type 3a, human leukocyte antigen genes, genetic polymorphism

For citation. Volkova N. V., Aksenova E. A., Yatskiu H. A., Solntseva A. V., Goncharova R. I. Association of HLA class II genes with autoimmune thyroid diseases in children with type 1 diabetes. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2024, vol. 68, no. 5, pp. 395–403 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2024-68-5-395-403>

Введение. Гены человеческого лейкоцитарного антигена (HLA – Human Leukocyte Antigen), также известные как гены главного комплекса гистосовместимости (МНС – Major Histocompatibility Complex), являются одним из важнейших факторов, влияющих на вероятность возникновения наиболее распространенных аутоиммунных заболеваний, включая сахарный диабет (СД) 1 типа, аутоиммунные тиреоидные заболевания (АИТЗ) и их сочетание (аутоиммунный полигланулярный синдром 3а типа – АПС 3а типа). На долю HLA приходится почти 50 % генетического риска данных эндокринопатий [1], из них самыми значимыми детерминантами являются гены HLA II класса *DRBI*, *DQAI* и *DQBI* [2].

Характерной особенностью генов HLA является полиморфность. Белки HLA II класса представляют собой гетеродимеры, состоящие из двух цепей (α и β), каждая из которых кодируется соответствующими генами A и B. В белках HLA-DR изменчивостью обладает только β -цепь, в то время как в HLA-DQ обе цепи вариабельны [2]. Наиболее полиморфные участки белков DR и DQ расположены в областях, образующих пептидсвязывающую борозду. Вариации аминокислотных последовательностей карманов этой борозды изменяют способность молекул HLA связывать и представлять антигены, запускать дальнейший иммунный ответ и, как следствие, являются определяющим фактором многих аутоиммунных заболеваний [2].

Предложены два механизма, с помощью которых определенные аллели генов HLA II класса могут быть вовлечены в общую этиологию СД 1 типа и АИТЗ. Согласно первому, две различные молекулы HLA II класса (например, DQ для СД 1 типа и DR для АИТЗ), находясь в тесном неравновесном сцеплении, совместно наследуются и экспрессируются на антигенпрезентирующих клетках. Таким образом, одна из них связывает пептиды островковых клеток поджелудочной железы, а другая – тиреоцитов [3]. Действительно, показано, что определяющую роль в предрасположенности к СД 1 типа играют гены *HLA-DQ* [4; 5], а АИТЗ в большей степени ассоциированы с *HLA-DR* [2; 4]. Согласно второму механизму, молекулярные последовательности карманов пептидсвязывающей борозды некоторых аллелей HLA, определяемые специфическими аминокислотами, обуславливают возможность презентации как тиреоидных, так и островковых антигенов. Кроме того, структура карманов HLA может влиять не только на связывание с пептидом, но и на закрепление Т-клеточного рецептора. Таким образом, определенные аутоантигенные пептиды с большей вероятностью будут представлены Т-клеткам, ускользнув от механизмов толерантности, тем самым индуцируя аутоиммунный процесс [3]. Выявление таких ключевых аминокислотных остатков карманов пептидсвязывающей борозды и определяющих их аллелей HLA имеет высокую практическую значимость для последующей разработки лекарственных средств. Так, в последние годы на мышинных моделях АИТЗ и АПС 3а типа активно изучаются препараты, способные блокировать связывание пептидов тиреоцитов и островковых клеток с HLA-DR3-карманом [5].

Показано, что аллели и гаплотипы HLA II класса, ассоциированные с СД 1 типа и АИТЗ, отличаются в разных популяциях. Например, некоторые гаплотипы, наиболее тесно связанные с предрасположенностью к СД 1 типа и АПС 3а типа в европоцентричных популяциях (*DR4-DQ8*,

DR3-DQ2), могут быть не применимы к другим этническим группам. В ряде стран восприимчивыми гаплотипами являются *DR4-DQ4* (Япония, Китай, Тайвань), *DR9-DQ9* (Япония) [2; 4]. Для Беларуси таких данных в настоящее время нет.

Цель исследования – выявление полиморфных вариантов генов HLA II класса, ассоциированных с риском развития аутоиммунной патологии щитовидной железы у детей с СД 1 типа в белорусской популяции.

Материалы и методы исследования. Для проведения исследования «случай-контроль» на базе 2-й городской детской клинической больницы г. Минска были сформированы две группы пациентов: 49 детей с АПС 3а типа (сочетанием СД 1 типа и аутоиммунного тиреоидита ($n = 47$) или болезни Грейвса ($n = 2$)) – основная группа; и 95 детей с СД 1 типа – группа сравнения ($n = 95$). В основную группу включены 32 девочки и 17 мальчиков, возраст 12,3 (10,4–15,6) лет; в группу сравнения – 41 девочка и 54 мальчика, возраст 11,6 (9,3–14,3) лет. Контрольную группу составили условно здоровые дети ($n = 24$, возраст 16,0 (15,8–17,0) лет, 13 девочек и 11 мальчиков), не имеющие аутоиммунных и хронических воспалительных заболеваний.

Сбор биологического материала осуществляли после получения письменного информированного согласия и одобрения проведения исследований этическим комитетом. Материалом исследования являлась геномная ДНК, выделенная из сухих пятен нативной венозной крови, нанесенных на фильтровальную бумагу, или из цельной венозной крови (для контрольной группы) методом фенол-хлороформной экстракции. В основной группе и группе сравнения HLA-типирование по генам *HLA-DRB1*, *-DQB1* и *-DQA1* проведено методом секвенирования SBT (Sequence-Based Typing) с использованием наборов SBTextcellerator и AlleleSEQR по протоколу производителя (GenDx). В контрольной группе таргетное HLA-типирование высокого разрешения выполнено на приборе MiSeq (Illumina) в режиме парных прочтений в формате кластерного секвенирования путем синтеза как указано в [6].

Статистическую обработку данных проводили с использованием программ Statistica 10.0, Medcalc. При сравнении частоты распространенности аллелей в исследуемых группах применяли двусторонний точный критерий Фишера и рассчитывали показатели отношения шансов (ОШ) с 95 %-ным доверительным интервалом (95 % ДИ).

Результаты и их обсуждение. В результате сравнительного анализа результатов HLA-типирования в группах установлены различия в распространенности ряда аллельных вариантов исследуемых генов (табл. 1).

Отмечено, что самыми распространенными аллелями у детей с АПС 3а типа и СД 1 типа были *DRB1*04* (52,0 и 44,2 % соответственно, $p > 0,05$). По данным литературы, ассоциация *HLA-DR4* с повышенным риском СД 1 типа у лиц европеоидной расы является известным фактом. Однако разные подтипы молекул DR4 могут быть как рисковыми, так нейтральными и защитными в отношении СД 1 типа [7]. Так, у шведских детей с СД 1 типа установлено четыре предрасполагающих подтипа (*DRB1*04:01*, **04:02*, **04:04*, **04:05*) и два протективных (*DRB1*04:03* и **04:07*). Исследование молекулярной последовательности белка HLA-DR привело к выделению трех позиций β -цепи белка ($\beta 71$, $\beta 74$, $\beta 86$), определенные мотивы которых являются предикторами островкового аутоиммунитета [7]. Наиболее изученной является позиция $\beta 74$, исключительная важность которой связана с расположением в кармане P4, где пептидсвязывающий мотив HLA перекрывается с участком стыковки с Т-клеточным рецептором. В молекулах HLA-DR4 остаток $\beta 74$ может быть занят незаряженным аланином (A) или отрицательно заряженной глутаминовой кислотой (E). Отрицательный заряд в данной области снижает сродство HLA-DR к антигенам. Действительно, во всех вариантах мотивов $\beta 71$ - $\beta 74$ - $\beta 86$, ассоциированных с повышенным риском СД 1 типа (KAG, EAV, RAG и RAV), в позиции $\beta 74$ находился остаток аланина, а в защитных (REG и REV) – глутаминовой кислоты (табл. 2) [7].

Мы сравнили суммарную частоту аллелей *DRB1*04*, содержащих мотивы «KAG», «EAV», «RAG» и «RAV» $\beta 71$ - $\beta 74$ - $\beta 86$ в исследуемых группах (*DRB1*04:01*, **04:02*, **04:04*, **04:05* и **04:10*), и обнаружили значительно большую их распространенность у детей с АПС 3а типа (45,9 %) и СД 1 типа (33,2 %), чем в группе контроля (4,3 %, $p < 0,001$) (табл. 1). Эти данные

Т а б л и ц а 1. Перечень статистически значимых различий частот распространенности HLA-аллелей между группами пациентов с АПС 3 типа, СД 1 типа и группой контроля

Table 1. The list of statistically significant differences in the prevalence of HLA alleles between the groups of patients with APS type 3a, T1D and the control group

Ген HLA HLA gene	Аллель Allele	АПС 3а типа, % APS type 3a, %	СД 1 типа, % T1D, %	Контроль, % Control, %	ОШ [95 % ДИ] OR [95 % CI]	<i>p</i>
DRB1	*04:Х*	45,9	33,2	4,3	¹ 1,71 [1,04–2,82]	0,0400
					² 18,68 [4,29–81,38]	<0,0001
					³ 10,91 [2,56–46,47]	<0,0001
	*07:01	4,1	8,9	17,4	¹ 0,43 [0,14–1,32]	0,1566
					² 0,20 [0,06–0,71]	0,0188
					³ 0,47 [0,19–1,16]	0,1100
	*11	0,0	1,6	13,0	¹ –	0,5534
					² –	0,0008
					³ 0,12 [0,03–0,51]	0,0022
	*15	4,1	1,6	15,2	¹ 2,65 [0,58–12,10]	0,2338
					² 0,24 [0,07–0,86]	0,0375
					³ 0,09 [0,02–0,36]	0,0005
DQA1	*01:02	5,1	2,1	20,9	¹ 2,47 [0,65–9,43]	0,2823
					² 0,20 [0,06–0,65]	0,0109
					³ 0,08 [0,02–0,28]	<0,0001
	*02:01	4,1	5,9	18,6	¹ 0,68 [0,21–2,21]	0,5906
					² 0,19 [0,05–0,66]	0,0078
					³ 0,27 [0,10–0,72]	0,0336
	*03	44,9	44,1	7,0	¹ 1,03 [0,63–1,68]	1,0
					² 10,86 [3,15–37,50]	<0,0001
					³ 10,34 [3,09–34,61]	<0,0001
	*06:01	12,2	6,9	0,0	¹ 1,88 [0,82–4,29]	0,1842
					² –	0,0180
					³ –	0,1344
DQB1	*04:02	30,2	29,3	5,3	¹ 1,05 [0,61–1,79]	0,8912
					² 8,01 [1,81–35,46]	0,0013
					³ 7,65 [1,78–32,85]	0,0009
	*06:02	1,0	0,5	10,3	¹ 1,97 [0,12–31,82]	1,0
					² 0,09 [0,01–0,85]	0,0244
					³ 0,05 [0,01–0,43]	0,0033

Примечания: ¹ – АПС 3а типа vs. СД 1 типа; ² – АПС 3а vs. контроль; ³ – СД 1 типа vs. контроль; *DRB1*04:Х – аллели DRB1*04:01, 04:02, 04:04, 04:05, 04:10.

Notes: ¹ – APS type 3a vs. T1D; ² – APS type 3a vs. controls; ³ – T1D vs. controls; *DRB1*04:Х – alleles DRB1*04:01, 04:02, 04:04, 04:05, 04:10.

Т а б л и ц а 2. Мотивы β71-β74-β86 разных подтипов HLA-DR4 и их эффекты в отношении риска СД 1 типа [7]

Table 2. β71-β74-β86 motifs of different subtypes of the HLA-DR4 and their effects on the risk of T1D [7]

Аллель Allele	Мотив β71-β74-β86 Motive β71-β74-β86			Эффект в отношении риска СД 1 типа Effect on the risk of T1D
	β71	β74	β86	
DRB1*04:01	К	А	Г	Рисковый
DRB1*04:02	Е	А	V	Рисковый
DRB1*04:03	Р	Е	V	Защитный
DRB1*04:04	Р	А	V	Рисковый
DRB1*04:05	Р	А	Г	Рисковый
DRB1*04:06	Р	Е	V	Редкий аллель
DRB1*04:07	Р	Е	Г	Защитный
DRB1*04:10	Р	А	V	Редкий аллель

Примечания: Е – глутаминовая кислота, К – лизин, Р – аргинин, А – аланин, Г – глицин, V – валин.

Notes: E – glutamic acid, K – lysine, R – arginine, A – alanine, G – glycine, V – valine.

соответствуют результатам шведского исследования [7]. При этом у детей с сочетанной аутоиммунной патологией установлена большая частота указанных аллелей, чем у сверстников с СД 1 типа (ОШ 1,71 [1,04–2,82], $p = 0,0400$). Отмечена также большая доля носителей вышеперечисленных аллелей среди пациентов с АПС 3а типа (65,3 %) по сравнению с СД 1 типа (46,3 %), ОШ = 2,18 [1,07–4,45], $p = 0,031$. Полученные данные позволяют сделать вывод, что носительство определенных подтипов *HLA-DR4* является не только маркером риска СД 1 типа и АПС 3а типа для здоровой детской популяции, но и повышает вероятность развития АИТЗ у детей с СД 1 типа. Наши результаты согласуются с данными греческого исследования, где выявлены значительно более высокие частоты ряда подтипов *HLA-DR4* (*DRB1*04:01*, **04:02*, **04:04* и **04:05*) у пациентов с АИТ по сравнению с группой контроля, в то время как *DRB1*04:07* и **04:03* чаще встречались у здоровых лиц. Авторы так же предположили, что полученные данные связаны с разницей строения кармана Р4 между подтипами DR4 [8].

Среди полиморфных вариантов гена *HLA-DQA1* аллель *DQA1*06:01* выявлен у пациентов с АПС 3а типа (12,2 %) и СД 1 типа (6,9 %) и не обнаружен у детей контрольной группы, причем статистически значимая разница установлена только между пациентами с полигландулярной патологией и здоровыми детьми ($p = 0,0180$) (табл. 1). В последние годы накапливаются данные, что связь определенных аллелей HLA с восприимчивостью к аутоиммунным заболеваниям обусловлена не только аллель-специфичной презентацией аутоантигенов, но и внутренней нестабильностью белка МНС [9]. Простейшим механизмом, посредством которого нестабильный протеин МНС может повышать риск аутоиммунных заболеваний, является неполная негативная селекция в тимусе. Неспособность образовать стабильные связи с аутоэпитопами и обеспечить полноценную презентацию антигенов приводит к высвобождению из тимуса аутореактивных Т-клеток [9]. Одним из методов анализа стабильности белка является измерение экспрессии белка МНС на клеточной поверхности (Δ МНС). В совместном исследовании японских и шведских ученых установлена обратная корреляция между Δ МНС и риском СД 1 типа и предположено наличие связи между внутренней нестабильностью HLA-DQ и заболеванием. В результате изучения аллель-специфичных последовательностей аминокислот белка HLA-DQA1 самая сильная связь с Δ МНС обнаружена у позиции 47 α . В отличие от типичных полиморфизмов МНС, позиция 47 α расположена вне пептидсвязывающей борозды и поверхности распознавания Т-клеточного рецептора. Ее могут занимать аргинин, лизин, глутамин и цистеин. Наиболее выраженная ассоциация СД 1 типа выявлена с вариантами HLA-DQA1, содержащими в положении 47 α цистеин и глутамин, причем они одновременно были связаны с самыми низкими показателями Δ МНС. Из всех аллельных вариантов DQA1 наименьшей Δ МНС обладал *DQA1*06:01* с цистеином с позиции 47 α [9]. Следовательно, у носителей аллеля *DQA1*06:01* можно ожидать повышенную вероятность аутоиммунной патологии, что подтверждается нашими результатами, в частности, наличием ассоциации с риском развития АПС 3а типа у здоровых детей. Однако отсутствие значимых отличий между пациентами с АПС 3а типа и изолированным СД 1 типа не позволяет считать данный аллель маркером предрасположенности к аутоиммунным тиреопатиям у детей с СД 1 типа.

Нами установлены более высокие частоты аллелей *DQA1*03* и *DQB1*04:02* у детей с АПС 3а типа и СД 1 типа по сравнению с группой контроля без значимых различий между собой (табл. 1). Согласно литературным данным, *DQA1*03* в комплексе с *DQB1*04:01/*04:02* (*DQ4.3*) и *DQB1*03:02* (*DQ8*) ассоциированы с повышенным риском развития СД 1 типа, и для указанных гаплотипов описан низкий уровень Δ МНС [9]. Ранее была показана связь аллеля *DQB1*04:02* с риском возникновения олигоартикулярного подтипа ювенильного ревматоидного артрита у белорусских детей [6].

Отмечена более высокая распространенность гаплотипа *DRB1*04:X~DQA1*03~DQB1*04:02* (*DR4-DQ4.3*) в обеих группах пациентов по сравнению с контролем (табл. 3). Вместе с тем один из вариантов данного гаплотипа, а именно *DRB1*04:02~DQA1*03~DQB1*04:02*, выявлен с более высокой частотой у детей с АПС 3а типа по сравнению с СД 1 типа (ОШ 4,79 [1,21–18,97], $p = 0,0346$) и не обнаружен в группе контроля. Это позволяет предположить, что указанный гаплотип может являться фактором риска развития АИТЗ у детей с СД 1 типа. Действительно, в литературе есть сведения о связи *DRB1*04:02* с аутоиммунными заболеваниями щитовидной железы, в частности, в Иране установлена его ассоциация с тиреоидитом Хашимото [10].

Т а б л и ц а 3. Перечень статистически значимых различий частот распространенности HLA-гаплотипов в группах пациентов с АПС 3а типа и СД 1 типа и в группе контроля

Т а б л е 3. The list of statistically significant differences in the prevalence of HLA haplotypes in the groups of patients with APS type 3a and T1D and in the control group

Гаплотип Haplotype	АПС 3а типа, % APS type 3a, %	СД 1 типа, % T1D, %	Контроль, % Control, %	ОШ [95 % ДИ] OR [95 % CI]	<i>p</i>
<i>DRB1*04:X~ DQA1*03~DQB1*04:02 (DR4-DQ4.3)</i>	17,3	14,4	2,2	¹ 1,25 [0,64–2,43]	0,4959
				² 9,44 [1,22–73,33]	0,0127
				³ 7,55 [1,00–57,07]	0,0211
<i>DRB1*04:02~ DQA1*03~DQB1*04:02</i>	7,1	1,6	0,0	¹ 4,79 [1,21–18,97]	0,0346
				² –	0,0971
				³ –	1,0
<i>DRB1*11~ DQA1*05~DQB1*03:01 (DR11-DQ7.5)</i>	0	0,5	9,1	¹ –	1,0
				² –	0,0084
				³ 0,05 [0,01–0,49]	0,0048
<i>DRB1*15~ DQA1*01:02~DQB1*06:02 (DR15-DQ6)</i>	0	0	9,1	¹ –	1,0
				² –	0,0084
				³ –	0,0011
<i>DRB1*07:01~ DQA1*02:01~DQB1*02:02/*03:03 (DR7-DQ2.2/9.2)</i>	2,0	2,6	13,6	¹ 0,77 [0,15–4,05]	1,0
				² 0,13 [0,03–0,68]	0,0112
				³ 0,17 [0,05–0,59]	0,0071

П р и м е ч а н и я: ¹ – АПС 3а типа vs. СД 1 типа; ² – АПС 3а vs. контроль; ³ – СД 1 типа vs. контроль.
 N o t e s: ¹ – APS type 3a vs. T1D; ² – APS type 3a vs. controls; ³ – T1D vs. controls.

Нами также выявлен ряд аллелей и гаплотипов, снижающих вероятность развития изучаемых аутоиммунных эндокринопатий у здоровых детей в белорусской популяции.

Установлен протективный эффект аллеля *DRB1*07:01* по отношению к АПС 3а типа (ОШ 0,20 [0,06–0,71], *p* = 0,0188), но не к изолированному СД 1 типа по сравнению с контрольной группой (табл. 1). Полученные результаты сопоставимы с данными хорватского исследования, где было отмечено значительное отличие частоты *DRB1*07* между контрольной группой и пациентами с АПС 3а типа, но не с СД 1 типа [11].

По данным литературы, *DRB1*07:01* находится в неравновесном сцеплении с *DQB1*02:02/*03:03* и *DQA1*02:01* [12]. Ранее сообщалось о протективном влиянии гаплотипов *DRB1*07:01~DQA1*02:01~DQB1*02:02* (*DR7-DQ2.2*) и *DRB1*07:01~DQA1*02:01~DQB1*03:03* (*DR7-DQ9.2*) в отношении СД 1 типа и АИТЗ у европеоидов [12; 13]. Известно, что гены *HLA-DQ* вносят значительный вклад в восприимчивость к островковому аутоиммунитету независимо или совместно с *HLA-DRB1*. Шведские ученые L. P. Zhao и др. показали, что аминокислотный мотив, образуемый *DQA1*02:01~B1*02:02*, ассоциирован с устойчивостью к СД 1 типа [14]. Еще одним фактором, объясняющим защитные свойства *DQ2.2* и *DQ9.2*, являются высокие показатели ΔMHC и стабильности данных гетеродимеров [9]. Нами обнаружены статистически значимые отличия в частоте гаплотипов *DRB1*07:01~DQA1*02:01~DQB1*02:02/*03:03* между детьми контрольной группы и АПС 3а типа (ОШ 0,13 [0,03–0,68], *p* = 0,0112) и СД 1 типа (ОШ 0,17 [0,05–0,59], *p* = 0,0071) без значимой разницы между группами пациентов (табл. 3). Это указывает на защитный эффект данных гаплотипов по отношению к риску развития изолированного СД 1 типа и в сочетании с АИТЗ для здорового детского контингента, но не аутоиммунных тиреопатий у детей с СД 1 типа.

Как показано в табл. 1, отмечена значительно большая распространенность аллелей *DRB1*11* и *DRB1*15* в контрольной группе по сравнению с обеими группами пациентов. Известно, что для них характерно неравновесное сцепление с определенными аллелями генов *DQ*, с которыми они образуют протективные по отношению СД 1 типа гаплотипы.

По литературным данным, в большинстве европейских популяций *DRB1*11* находится в сцеплении с комплексом *DQA1*05:01~DQB1*03:01*, и носительство данного гаплотипа снижает вероятность развития СД 1 типа в молодом возрасте [15]. В свою очередь *DQA1*05~DQB1*03:01*

образует стабильный белок DQ7.5, ассоциированный со сниженным риском СД 1 типа в европейских и японской популяциях [9]. Полученные нами результаты для белорусской популяции соответствуют литературным источникам: частота гаплотипа *DQA1*05~DQB1*03:01* составила 14,3 % в контрольной группе; 2,0 % у детей с АПС 3а типа (ОШ 0,13 [0,02–0,65], $p = 0,0093$) и 2,1 % – с СД 1 типа (ОШ 0,13 [0,03–0,48], $p = 0,0030$). Гаплотип *DRB1*11~DQA1*05:01~DQB1*03:01* значительно чаще встречался в группе контроля по сравнению с СД 1 типа (ОШ 0,05 [0,01–0,49], $p = 0,0048$) и не обнаружен среди пациентов с АПС 3а типа ($p = 0,0084$) (табл. 3).

Известно, что для *DRB1*15* характерно сильное неравновесное сцепление с *DQA1*01:02~DQB1*06:02* (*DQ6*) [16]. Гаплотип *DR15~DQA1*01:02~DQB1*06:02* распространен в европейской популяции (около 14 %), в то время как среди людей с СД 1 его частота составляет менее 1 % [16]. Защитное действие данного гаплотипа связывают с вмешательством в презентацию островковых аутоантигенов посредством механизма, получившего название «кража эпитопа». Гетеродимер *DQA1*01:02~DQB1*06:02* демонстрирует высокие пептидсвязывающие характеристики и стабильность, позволяющие этой молекуле конкурировать в связывании диабетогенных эпитопов с предрасполагающими молекулами HLA таким образом, что последние не могут презентировать аутоантигены и индуцировать эффекторные реакции Т-клеток [16]. В нашей выборке гаплотип *DR15~DQA1*01:02~DQB1*06:02* выявлен с частотой 9,1 % среди детей контрольной группы и не обнаружен у пациентов с АПС 3а типа и СД 1 типа ($p = 0,0084$ и $0,0011$ соответственно) (табл. 3).

Закключение. Выявлена большая суммарная распространенность подтипов *HLA-DR4* (*DRB1*04:01*, **04:02*, **04:04*, **04:05* и **04:10*) у пациентов с АПС 3а типа и СД 1 типа по сравнению с группой контроля. При этом у детей с сочетанной аутоиммунной патологией установлена большая частота указанных аллелей, чем у сверстников с изолированным СД 1 типа. Полученные данные позволяют выделить данные аллели как маркеры риска развития СД 1 типа и АПС 3а типа в здоровой детской популяции, а также АИТЗ – у детей с СД 1 типа.

Отмечена более высокая частота гаплотипа *DRB4-DQ4.3* в обеих группах пациентов по сравнению с группой контроля. Следовательно, носительство указанного гаплотипа повышает вероятность развития СД 1 типа и АПС 3а типа у здоровых детей в белорусской популяции. В то же время одна из разновидностей данного гаплотипа (*DRB1*04:02~DQA1*03~DQB1*04:02*) ассоциирована с повышенным риском АИТЗ у детей с СД 1 типа.

Выявлен ряд протективных аллелей: *DRB1*07:01* – в отношении риска АПС 3а типа у здоровых детей, а также гаплотипов *DQ* и *DR-DQ* (*DQ7.5*, *DQ6*, *DQ2.2*; *DR15-DQ7.5*, *DR11-DQ6*, *DR7-DQ2.2/9.2*) – в отношении риска АПС 3а типа и СД 1 типа в здоровой популяции.

Найденные закономерности свидетельствуют о наличии в белорусской популяции общего спектра аллелей и гаплотипов HLA II класса, ассоциированных с предрасположенностью (*DRB1*04:01*, **04:02*, **04:04*, **04:05* и **04:10*; *DRB4-DQ4.3*) и резистентностью (*DQ7.5*, *DQ6*, *DQ2.2*; *DR15-DQ7.5*, *DR11-DQ6*, *DR7-DQ2.2/9.2*) к СД 1 типа и АПС 3а типа у здоровых детей. Полученные результаты согласуются с данными других работ [2; 4; 5; 14], в которых показано, что определяющее значение в этиопатогенезе СД 1 типа имели гены *HLA-DQ* в сочетании с *HLA-DRB1*, а отсутствующих АИТЗ при СД 1 типа – преимущественно гены *HLA-DRB1*.

Благодарности. Авторы выражают благодарность сотрудникам лабораторий нехромосомной наследственности и молекулярных основ стабильности генома Института генетики и цитологии НАН Беларуси, принявшим участие в исследовании. Работа выполнена по договору № 2018-28-006 от 23.03.2018 на выполнение НИОК(Т)Р вне рамок государственных программ, государственных (отраслевых) научно-технических программ за счет средств республиканского централизованного инновационного фонда.

Acknowledgements. The authors express their gratitude to the staff of the Laboratory of Non-chromosomal heredity and the Laboratory of Molecular Basis of Genome Stability of the Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Sciences of Belarus, who participated in the study. The work was performed under contract No. 2018-28-006 dated 03.23.2018 for the performance of researches outside the state programs, state (sectoral) scientific and technical programs at the expense of the republican centralized innovation fund.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Type 1 diabetes in diverse ancestries and the use of genetic risk scores / M. J. Redondo [et al.] // *Lancet Diabetes Endocrinol.* – 2022. – Vol. 10, N 8. – P. 597–608. [https://doi.org/10.1016/s2213-8587\(22\)00159-0](https://doi.org/10.1016/s2213-8587(22)00159-0)
2. Important denominator between autoimmune comorbidities: a review of class II HLA, autoimmune disease, and the gut / M. A. Berryman [et al.] // *Front. Immunol.* – 2023. – Vol. 14. – Art. 1270488. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2023.1270488>
3. Biondi, B. Thyroid dysfunction and diabetes mellitus: two closely associated disorders / B. Biondi, G. J. Kahaly, R. P. Robertson // *Endocr. Rev.* – 2019. – Vol. 40, N 3. – P. 789–824. <https://doi.org/10.1210/er.2018-00163>
4. Frommer, L. Type 1 diabetes and autoimmune thyroid disease—the genetic link / L. Frommer, G. J. Kahaly // *Front. Endocrinol.* – 2021. – Vol. 12. – Art. 618213. <https://doi.org/10.3389/fendo.2021.618213>
5. Cepharanthine blocks presentation of thyroid and islet peptides in a novel humanized autoimmune diabetes and thyroiditis mouse model / C. W. Li [et al.] // *Front. Immunol.* – 2021. – Vol. 12. – Art. 796552. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2021.796552>
6. Характерные особенности спектров HLA-аллелей классов I и II у пациентов с различными клиническими формами ювенильного идиопатического артрита в Республике Беларусь / А. А. Яцкив [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2020. – Т. 64, № 2. – С. 209–216. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-2-209-216>
7. The KAG motif of HLA-DRB1 (β 71, β 74, β 86) predicts seroconversion and development of type 1 diabetes / L. P. Zhao [et al.] // *eBioMedicine.* – 2021. – Vol. 69. – Art. 103431. <https://doi.org/10.1016/j.ebiom.2021.103431>
8. Major histocompatibility complex class II (DRB1*, DQA1*, and DQB1*) and DRB1*04 subtypes' associations of Hashimoto's thyroiditis in a Greek population / G. Kokaraki [et al.] // *Tissue Antigens.* – 2009. – Vol. 73, N 3. – P. 199–205. <https://doi.org/10.1111/j.1399-0039.2008.01182.x>
9. Cell-surface MHC density profiling reveals instability of autoimmunity-associated HLA / H. Miyadera [et al.] // *J. Clin. Invest.* – 2015. – Vol. 125, N 1. – P. 275–291. <https://doi.org/10.1172/jci74961>
10. Shirizadeh A., Borzouei S., Razavi Z., Taherkhani A., Faradmal J., Solgi G. Determination of HLA class II risk alleles and prediction of self/non-self-epitopes contributing Hashimoto's thyroiditis in a group of Iranian patients / A. Shirizadeh [et al.] // *Immunogenetics.* – 2024. – Vol. 76. – P. 175–187. <https://doi.org/10.1007/s00251-024-01339-7>
11. Human Leukocyte Antigen class II polymorphisms among Croatian patients with type 1 diabetes and autoimmune polyglandular syndrome type 3 variant / Z. Grubic [et al.] // *Gene.* – 2018. – Vol. 674. – P. 93–97. <https://doi.org/10.1016/j.gene.2018.06.083>
12. Redondo, M. J. Genetics of type 1 diabetes. *Pediatr Diabetes* / M. J. Redondo, A. K. Steck, A. Pugliese // *Pediatric Diabetes.* – 2018. – Vol. 19. – P. 346–353. <https://doi.org/10.1111/ledi.12597>
13. Actual associations between HLA haplotype and graves' disease development / K. Zawadzka-Starczewska [et al.] // *J. Clin. Med.* – 2022. – Vol. 11, N 9. – Art. 2492. <https://doi.org/10.3390/jcm11092492>
14. Nine residues in HLA-DQ molecules determine with susceptibility and resistance to type 1 diabetes among young children in Sweden / L. P. Zhao [et al.] // *Sci. Rep.* – 2021. – Vol. 11. – Art. 8821. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86229-8>
15. The clinical course of patients with preschool manifestation of type 1 diabetes is independent of the HLA DR-DQ genotype / C. Reinauer [et al.] // *Genes.* – 2017. – Vol. 8, N 5. – Art. 146. <https://doi.org/10.3390/genes8050146>
16. Failed genetic protection: type 1 diabetes in the presence of HLA-DQB1*06:02 / K. M. Simmons [et al.] // *Diabetes.* – 2020. – Vol. 69, N 8. – P. 1763–1769. <https://doi.org/10.2337/db20-0038>

References

1. Redondo M. J., Gignoux C. R., Dabelea D., Hagopian W. A., Onengut-Gumuscu S., Oram R. A., Rich S. S. Type 1 diabetes in diverse ancestries and the use of genetic risk scores. *Lancet Diabetes and Endocrinology*, 2022, vol. 10, no. 8, pp. 597–608. [https://doi.org/10.1016/s2213-8587\(22\)00159-0](https://doi.org/10.1016/s2213-8587(22)00159-0)
2. Berryman M. A., Ilonen J., Triplett E. W., Ludvigsson J. Important denominator between autoimmune comorbidities: a review of class II HLA, autoimmune disease, and the gut. *Frontiers in Immunology*, 2023, vol. 14, art. 1270488. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2023.1270488>
3. Biondi B., Kahaly G. J., Robertson R. P. Thyroid dysfunction and diabetes mellitus: two closely associated disorders. *Endocrine Reviews*, 2019, vol. 40, no 3, pp. 789–824. <https://doi.org/10.1210/er.2018-00163>
4. Frommer L., Kahaly G. J. Type 1 diabetes and autoimmune thyroid disease – the genetic link. *Frontiers in Endocrinology*, 2021, vol. 12, art. 618213. <https://doi.org/10.3389/fendo.2021.618213>
5. Li C. W., Osman R., Menconi F., Faustino L. C., Kim K., Clarke O. B., Hou H., Tomer Y. Cepharanthine blocks presentation of thyroid and islet peptides in a novel humanized autoimmune diabetes and thyroiditis mouse model. *Frontiers in Immunology*, 2021, vol. 12, art. 796552. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2021.796552>
6. Yatskiu H. A., Zlotnikova M. V., Sukalo A. V., Goncharova R. I. Characteristic spectra of class I and II HLA-alleles in patients with different clinical forms of juvenile idiopathic arthritis in the Republic of Belarus. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2020, vol. 64, no. 2, pp. 209–216 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-2-209-216>
7. Zhao L. P., Papadopoulos G. K., Lybrand T. P., Moustakas A. K., Bondinas G. P., Carlsson A., Larsson H. E., Ludvigsson J., Marcus C., Persson M., Samuelsson U., Wang R., Pyo C. W., Nelson W. C., Geraghty D. E., Rich S. S., Lernmark A. The KAG motif of HLA-DRB1 (β 71, β 74, β 86) predicts seroconversion and development of type 1 diabetes. *eBioMedicine*, 2021, vol. 69, art. 103431. <https://doi.org/10.1016/j.ebiom.2021.103431>

8. Kokaraki G., Daniilidis M., Yiangou M., Arsenakis M., Karyotis N., Tsilipakou M., Fleva A., Gerofotis A., Karadani N., Yovos J. G. Major histocompatibility complex class II (DRB1*, DQA1*, and DQB1*) and DRB1*04 subtypes' associations of Hashimoto's thyroiditis in a Greek population. *Tissue Antigens*, 2009, vol. 73, no. 3, pp. 199–205. <https://doi.org/10.1111/j.1399-0039.2008.01182.x>
9. Miyadera H., Ohashi J., Lernmark A., Kitamura T., Tokunaga K. Cell-surface MHC density profiling reveals instability of autoimmunity-associated HLA. *Journal of Clinical Investigation*, 2015, vol. 125, no. 1, pp. 275–291. <https://doi.org/10.1172/jci74961>
10. Shirizadeh A., Borzouei S., Razavi Z., Taherkhani A., Faradmal J., Solgi G. Determination of HLA class II risk alleles and prediction of self/non-self-epitopes contributing Hashimoto's thyroiditis in a group of Iranian patients. *Immunogenetics*, 2024, vol. 76, pp. 175–187. <https://doi.org/10.1007/s00251-024-01339-7>
11. Grubic Z., Putarek N. R., Maskalan M., Zunec R., Jankovic K. S., Kamenaric M. B., Knezevic-Cuca J., Uroic A. S., Domic M. Human Leukocyte Antigen class II polymorphisms among Croatian patients with type 1 diabetes and autoimmune polyglandular syndrome type 3 variant. *Gene*, 2018, vol. 674, pp. 93–97. <https://doi.org/10.1016/j.gene.2018.06.083>
12. Redondo M. J., Steck A. K., Pugliese A. Genetics of type 1 diabetes. *Pediatric Diabetes*, 2018, vol. 19, pp. 346–353. <https://doi.org/10.1111/medi.12597>
13. Zawadzka-Starczewska K., Tymoniuk B., Stasiak B., Lewiński A., Stasiak M. Actual associations between HLA haplotype and graves' disease development. *Journal of Clinical Medicine*, 2022, vol. 11, no. 9, art. 2492. <https://doi.org/10.3390/jcm11092492>
14. Zhao L. P., Papadopoulos G. K., Moustakas A. K., Bondinas G. P., Carlsson A., Larsson H. E., Ludvigsson J., Marcus C., Persson M., Samuelsson U., Wang R., Pyo C. W., Geraghty D. E., Lernmark A. Nine residues in HLA-DQ molecules determine with susceptibility and resistance to type 1 diabetes among young children in Sweden. *Scientific Reports*, 2021, vol. 11, art. 8821. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86229-8>
15. Reinauer C., Rosenbauer J., Bächle C., Herder C., Roden M., Ellard S., De Franco E., Karges B., Holl R., Enczmann J., Meissner T. The clinical course of patients with preschool manifestation of type 1 diabetes is independent of the HLA DR-DQ genotype. *Genes*, 2017, vol. 8, no. 5, art. 146. <https://doi.org/10.3390/genes8050146>
16. Simmons K. M., Mitchell A. M., Alkanani A. A., McDaniel K. A., Baschal E. E., Armstrong T., Pyle L., Yu L., Michels A. W. Failed genetic protection: type 1 diabetes in the presence of HLA-DQB1*06:02. *Diabetes*, 2020, vol. 69, no. 8, pp. 1763–1769. <https://doi.org/10.2337/db20-0038>

Информация об авторах

Волкова Наталия Васильевна – врач-детский эндокринолог. 2-я городская детская клиническая больница г. Минска (ул. Нарочанская, 17, 220020, Минск, Республика Беларусь); аспирант. Белорусский государственный медицинский университет (пр. Дзержинского, 83, 220083, Минск, Республика Беларусь). E-mail: volkova_nv@tut.by

Аксенова Елена Анатольевна – канд. биол. наук.

Яцкив Анна Андреевна – канд. биол. наук, ст. науч. сотрудник. Институт генетики и цитологии НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: a.yatskiv@igc.by

Солнцева Анжелика Викторовна – д-р мед. наук, профессор, директор. РНПЦ детской онкологии, гематологии и иммунологии (ул. Фрунзенская, 43, 223053, Минский р-н, д. Боровляны, Республика Беларусь); заведующая кафедрой. Белорусский государственный медицинский университет (пр. Дзержинского, 83, 220083, Минск, Республика Беларусь). E-mail: ang_solntseva@mail.ru

Гончарова Роза Иосифовна – д-р биол. наук, профессор, гл. науч. сотрудник. Институт генетики и цитологии НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: R.Goncharova@igc.by. ORCID: 0000-0002-9326-7796.

Information about the authors

Volkova Natalya V. – Pediatric Endocrinologist. 2nd City Children's Clinical Hospital (17, Narochanskaya Str., 220020, Minsk, Republic of Belarus); Postgraduate Student. Belarusian State Medical University (83, Dzerzhinsky Ave., 220083, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: volkova_nv@tut.by

Aksenova Elena A. – Ph. D. (Biology).

Yatskiu Hanna A. – Ph. D. (Biology), Senior Researcher. Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: a.yatskiv@igc.by

Solntseva Angelika V. – D. Sc. (Medicine), Professor, Director. Republican Scientific and Practical Center for Pediatric Oncology, Hematology and Immunology (43, Frunzenskaya Str., 223053, Borovlyany vil., Minsk Region and District, Republic of Belarus); Head of the Department. Belarusian State Medical University (83, Dzerzhinsky Ave., 220083, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ang_solntseva@mail.ru

Goncharova Roza I. – 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: R.Goncharova@igc.by. ORCID: 0000-0002-9326-7796.

НАУКИ О ЗЕМЛЕ
EARTH SCIENCESУДК 550.4:504.5(476)
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2024-68-5-404-412>Поступило в редакцию 29.08.2024
Received 29.08.2024**С. В. Какарека, О. Ю. Круковская***Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь***РЕТРОСПЕКТИВНАЯ ОЦЕНКА ВЫБРОСОВ ДИОКСИДА СЕРЫ И ОКСИДОВ АЗОТА
В АТМОСФЕРНЫЙ ВОЗДУХ ОТ СТАЦИОНАРНЫХ ИСТОЧНИКОВ
НА ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ***(Представлено академиком В. Ф. Логиновым)*

Аннотация. Разработаны алгоритмы решения задачи получения полных рядов данных, характеризующих интенсивность выбросов загрязняющих веществ от источников в разрезе секторов экономики, за период с 1950 по 2020 г. Впервые получены научно обоснованные оценки выбросов в Беларуси диоксида серы и оксидов азота от основных стационарных источников выбросов за этот период. Установлено, что валовые выбросы диоксида серы непрерывно возрастали в период с 1950 по 1980 г. и увеличились за этот период почти в 39 раз (с 22,3 до 862,4 тыс. т), что обусловлено ростом сжигания каменного угля и мазута и развитием нефтепереработки. Затем отмечался десятилетний период умеренного сокращения выбросов в среднем на 2,9 % в год. С 1991 г. начался период быстрого сокращения выбросов (в среднем на 19,4 % в год) до уровня 80,7 тыс. т в 2000 г. В последующий период выбросы характеризовались в основном медленным сокращением до среднего уровня 45–55 тыс. т/год. Выбросы оксидов азота отмечались быстрым ростом в первые три десятилетия рассматриваемого периода (с 13,5 тыс. т в 1950 г. до 134,5 тыс. т в 1979 г.), что связано с общим ростом потребления топлива. В 1980-е годы отмечен медленный спад до 112,2 тыс. т в 1991 г., сменившийся более интенсивным сокращением в последующие годы. В 2000 г. наблюдался наиболее низкий начиная с середины 1960-х годов уровень выбросов – 53,1 тыс. т. В последующий период происходили в основном колебания уровней выбросов оксидов азота. Показано, что полученные оценки выбросов диоксида серы и оксидов азота существенно более точные, чем имеющиеся оценки исторических выбросов в рамках Комплексной системы данных о выбросах (CEDS).

Ключевые слова: выбросы, ретроспективная оценка, диоксид серы, диоксид азота

Для цитирования. Какарека, С. В. Ретроспективная оценка выбросов диоксида серы и оксидов азота в атмосферный воздух от стационарных источников на территории Беларуси / С. В. Какарека, О. Ю. Круковская // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2024. – Т. 68, № 5. – С. 404–412. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2024-68-5-404-412>

Sergey V. Kakareka, Olga Yu. Krukowskaya*Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus***RETROSPECTIVE ASSESSMENT OF SULFUR DIOXIDE AND NITROGEN OXIDE EMISSIONS FROM
STATIONARY SOURCES IN BELARUS***(Communicated by Academician Vladimir F. Loginov)*

Abstract. Algorithms for extrapolating series of statistical data and filling data gaps have been developed. For the first time scientifically valid estimates of sulfur dioxide and nitrogen oxide emissions from major stationary emission sources in Belarus have been obtained for the period from 1950 to 2020. Scientifically valid estimates of sulfur dioxide and nitrogen oxide emissions from major stationary sources over this period in Belarus were obtained for the first time. It was found that sulfur dioxide emissions continuously increased from 1950 to 1980 and grew almost 39 times during this period (from 22.3 to 862.4 thousand tons) attributed to increased combustion of coal, fuel oil and oil refining development. Subsequently, there was

a decade of moderate emission reduction on average by 2.9 % per year. Started in 1991, there was a period of a rapid emission reduction (on average by 19.4 % per year) until reaching 80.7 thousand tons in 2000. In the subsequent period, emissions were mainly characterized by a slow decrease to an average level of 45–55 thousand tons per year. Nitrogen oxide emissions showed a rapid growth in the first three decades of the analyzed period (from 13.5 thousand tons in 1950 to 134.5 thousand tons in 1979), which is connected with an overall increase in fuel consumption. In the 1980s, there was a slow decrease up to 112.2 thousand tons in 1991, followed by more intensive reductions in the following years. In 2000, the lowest level of nitrogen oxide emissions since the mid-1960s was observed – 53.1 thousand tons. Subsequent periods were mainly marked by fluctuations in nitrogen oxide emission levels. The obtained results are significantly more accurate than the existing estimates of historical emissions within the Comprehensive Emissions Data System (CEDs).

Keywords: emissions, retrospective assessment, sulfur dioxide, nitrogen oxides

For citation. Kakareka S. V., Krukowskaya O. Yu. Retrospective assessment of sulfur dioxide and nitrogen oxide emissions from stationary sources in Belarus. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2024, vol. 68, no. 5, pp. 404–412 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2024-68-5-404-412>

Введение. Национальные кадастры выбросов загрязняющих веществ и парниковых газов поддерживаются в большинстве стран мира. На основе национальных кадастров и национальной отчетности формируются глобальные и региональные базы данных о выбросах в рамках таких международных соглашений, как Рамочная конвенция об изменении климата ИРСС (база МГЭИК) и Конвенция о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния [1]. В то же время эти базы данных не полностью удовлетворяют потребности модельного сообщества. Одним из существенных недостатков является ограниченный временной охват этих баз данных. В частности, база данных о выбросах в рамках Программы ЕМЕП WebDab содержит достаточно полную информацию о выбросах основных и специфических загрязняющих веществ только для периода с 1990 года. В связи с этим возникают проблемы с информационным обеспечением моделирования изменений химического состава атмосферы.

В последние годы разработан ряд глобальных кадастров выбросов большого временного охвата. Так, в [2] разработан набор исторических данных для фазы 5 Проекта взаимного сравнения связанных моделей (CMIP5), который включает глобальные оценки антропогенных выбросов и выбросов от открытого горения за 1850–2000 гг. Данные CMIP5 являются компиляцией «наилучших имеющихся оценок» из множества источников, включая EDGAR-HYDE [3], RETRO [4].

Наиболее полной базой данных о ретроспективных выбросах является Комплексная система данных о выбросах (CEDs) (A Community Emissions Data System), которая содержит оценки глобальных выбросов в атмосферу за индустриальную эпоху (с 1750 по 2014 г.) в разрезе категорий источников и стран. Однако содержащиеся в ней оценки выбросов нуждаются в верификации, поскольку для периода до 1990 года получены во многих случаях с использованием недостаточно обоснованных экстраполяций.

Цель работы – разработка алгоритмов решения задачи получения исторических рядов выбросов диоксида серы и оксидов азота от основных категорий стационарных источников на территории Беларуси за период с 1950 по 2020 г.

Материалы и методы исследования. *Общая методология получения рядов выбросов.* Выбросы оценивались в годовом разрезе. Расчет выбросов выполнялся с использованием общепринятой методологии и базировался на информации об экономической деятельности в основных секторах и удельных показателях выбросов.

Основная расчетная формула:

$$E_{i,n} = \sum P_{j,n} F_{i,j,n},$$

где $E_{i,n}$ – выбросы вещества i в год n , т/год; $P_{j,n}$ – интенсивность деятельности в секторе j в год n , т/год (ГДж/год); $F_{i,j,n}$ – удельный выброс вещества i в секторе j в год n , г/т (г/ГДж).

Расчет выбросов за анализируемый период включал решение следующих задач:

сбор информации, характеризующей производственную активность в основных видах хозяйственной деятельности – источниках выбросов загрязняющих веществ, за исследуемый период;

разработка алгоритмов и процедур заполнения имеющихся пробелов в производственно-статистических данных и получение полных рядов данных;

сбор информации об удельных показателях выбросов загрязняющих веществ с учетом их возможного изменения за анализируемый период;
выполнение расчета выбросов, верификация.

Сбор производственно-статистической информации. К основным стационарным источникам выбросов диоксида серы и оксидов азота относятся сжигание топлива в топливосжигающих установках (в энергетике, жилищно-коммунальном секторе, сельском и лесном хозяйстве и других секторах), нефтепереработка, металлургическая промышленность, производство строительных материалов, производство минеральных удобрений.

Исходными данными при расчете выбросов являлись:

для стационарного сжигания топлива – объем сжигаемого топлива по секторам и видам;

для промышленных процессов – объем производства основных видов продукции.

Основные использованные источники производственно-статистической информации:

1950–1979 гг. – сборники Минстата БССР и СССР за указанный период, справочники, другие публикации. Основная информация об интенсивности деятельности за этот период получена из статистических ежегодников «Народное хозяйство СССР», «Народное хозяйство БССР», юбилейных сборников, статистических сборников по отраслям [5; 6];

1980–1989 гг. – сводные данные Национального статистического комитета [7], дополненные информацией из статистических сборников Минстата БССР и СССР;

1990–2020 гг. – сводные данные Национального статистического комитета [7].

Выявлено, что полнота доступных статистических данных неодинакова в разные периоды для разных видов деятельности. Так, данные по производству стали есть практически для всего времени, исключение составляют два периода: 1976–1979 и 1981–1984 гг. Данные по производству чугуна доступны только с 1990 г. Ряд объемов производства цемента по полноте схож с рядом для производства стали. Для объема производства азотных удобрений нет данных для периодов 1966–1969 гг., 1984 г. и 1991–1994 гг.

Данные о производстве и использовании топлива до 1980 г. весьма отрывочны. Фактически более-менее полные ряды данных имеются только для добычи топливного торфа, отчасти – нефти. Наиболее ранние детальные данные по топливному балансу имеются для 1975 и 1980 гг. [5; 6]. Для более раннего периода имеются лишь данные о структуре топливного баланса Беларуси [8].

Пробелы в данных о промышленном производстве в основном заполнялись путем интерполяции значений между граничными значениями периода с пробелом. Использовались также данные предприятий, доступные в открытых источниках (нефтепереработка, металлургическая промышленность, производство удобрений).

Поскольку для добычи топливного торфа имелись наиболее полные годовые данные, потребление топлива по видам (природный газ, уголь, мазут, дрова) в 1950, 1955, 1960, 1965 и 1970 гг. определялось как произведение объема добычи топливного торфа, деленное на долю торфа в топливном балансе по опубликованным данным и умноженное на долю того или иного вида искомого топлива. Потребление топлива в промежуточные годы определялось путем интерполяции граничных значений. На рис. 1 приведен реконструированный ряд потребления топлива стационарными источниками за период с 1950 года.

В результате обработки статистической информации подготовлена база данных, содержащая данные по производству основных видов промышленной продукции и потреблению основных видов топлива для периода 1950–1989 гг., которая по формату совместима с базой статистических данных за 1990–2020 гг., подготовленной и обновляемой в рамках ежегодной оценки выбросов (European Environment Agency) в соответствии с методологией (EMEP/EEA).

Удельные показатели выбросов. Удельные показатели выбросов характеризуют выделение загрязняющих веществ на единицу сожженного топлива, потребления сырья или производства продукции и определяются используемыми технологиями производства и методами снижения выбросов.

Анализ доступной информации о технологиях в энергетике, промышленности и сельском хозяйстве показал, что на данном этапе могут быть использованы в расчетах удельные показатели выбросов, единые для всего исследуемого периода.

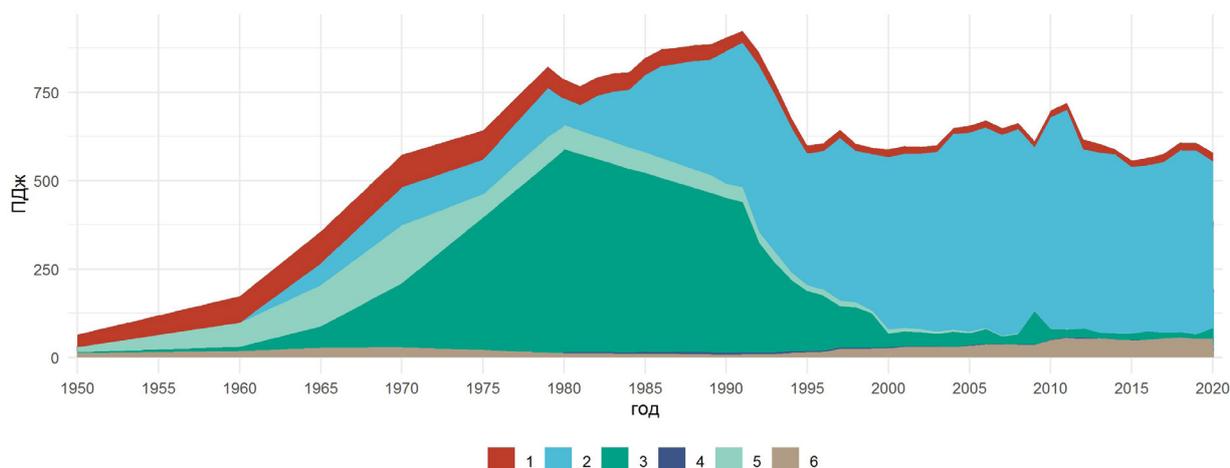


Рис. 1. Реконструированный ряд валового потребления топлива стационарными источниками в Беларуси с 1950 по 2020 г., ПДж: 1 – торф, 2 – газ природный, 3 – мазут, 4 – дизельное топливо, 5 – уголь, 6 – дрова и прочая биомасса

Fig. 1. Reconstructed series of gross fuel consumption by stationary sources in Belarus from 1950 to 2020, PJ: 1 – peat, 2 – natural gas, 3 – heavy fuel oil, 4 – diesel, 5 – coal, 6 – wood and biomass

Основные использованные источники информации об удельных показателях выбросов – Руководство по инвентаризации и проектированию выбросов ЕМЕП/ЕЕА [9], база данных об удельных показателях выбросов ЕМЕП, Руководство AP-42 Агентства по охране окружающей среды США [10], результаты собственных исследований. Удельные показатели выбросов, использованные в расчетах, в агрегированном виде приведены в табл. 1 и 2.

Т а б л и ц а 1. Удельные показатели выбросов диоксида серы и азота при стационарном сжигании, использованные в расчетах выбросов, кг/ГДж

Table 1. Emission factors of sulfur dioxide and nitrogen oxides emissions from stationary combustion used in emission calculations, kg/GJ

Топливо Fuel	Удельный показатель выбросов SO ₂ Specific emission factor SO ₂		Удельный показатель выбросов NO _x Specific emission factor NO _x	
	Энергетика, жилищно-коммунальное хозяйство и другие отрасли Energy, housing and utilities and other industries	Бытовой сектор Household sector	Энергетика, жилищно-коммунальное хозяйство и другие отрасли Energy, housing and utilities and other industries	Бытовой сектор Household sector
Уголь	1,00725	0,96	0,21	0,11
Торф топливный	0,095	0,095	0,243	0,11
Дрова и древесное топливо	0,07	0,07	0,08	0,05
Мазут	1,29	0,864	0,14	0,05
Другое жидкое топливо	0,05	0,05	0,065	0,05
Природный газ	0	0	0,05	0,05
Сжиженный газ	0	0	0,04	0,04

Расчет ретроспективных выбросов загрязняющих веществ выполнялся с использованием программного модуля подготовки национальных выбросов для Программы ЕМЕП, дополненного базами данных о деятельности за 1950–1989 гг. в СУБД MS Access.

Результаты и их обсуждение. Результаты ретроспективной оценки выбросов диоксида серы и оксидов азота от основных стационарных источников выбросов с 1950 по 2020 г. приведены на рис. 2.

Диоксид серы. Валовые выбросы диоксида серы непрерывно возрастали с 1950 (когда они составляли 22,3 тыс. т) по 1980 г. (до 862,4 тыс. т) (рис. 2), что обусловлено ростом сжигания каменного угля и мазута и ростом объемов нефтепереработки. Затем последовал десятилетний

Т а б л и ц а 2. Удельные показатели выбросов диоксида серы и азота от производственных процессов, использованные в расчетах выбросов, г/т

T a b l e 2. Emission factors of sulfur dioxide and nitrogen oxides emissions from production processes used in emission calculations, g/ton

Код сектора Sector code	Сектор Sector	Удельный показатель выбросов, г/т Specific emission factor, g/t	
		SO ₂	NO _x
030303	Производство чугуна и литых изделий	1,72	0,285
030311	Производство цемента	0,214	2,01
030312	Производство извести	0,316	2,01
030313	Производство асфальтобетона	0,0177	0,0356
030314	Производство стекла	1,96	2,93
030319	Производство кирпича	0,166	0,142
040101	Переработка нефти	0,9	0,296
090203	Сжигание попутного газа в факеле	0,0808	0,0151
040207	Производство стали	0,06	0,419
040602	Целлюлозно-бумажное производство	2	1

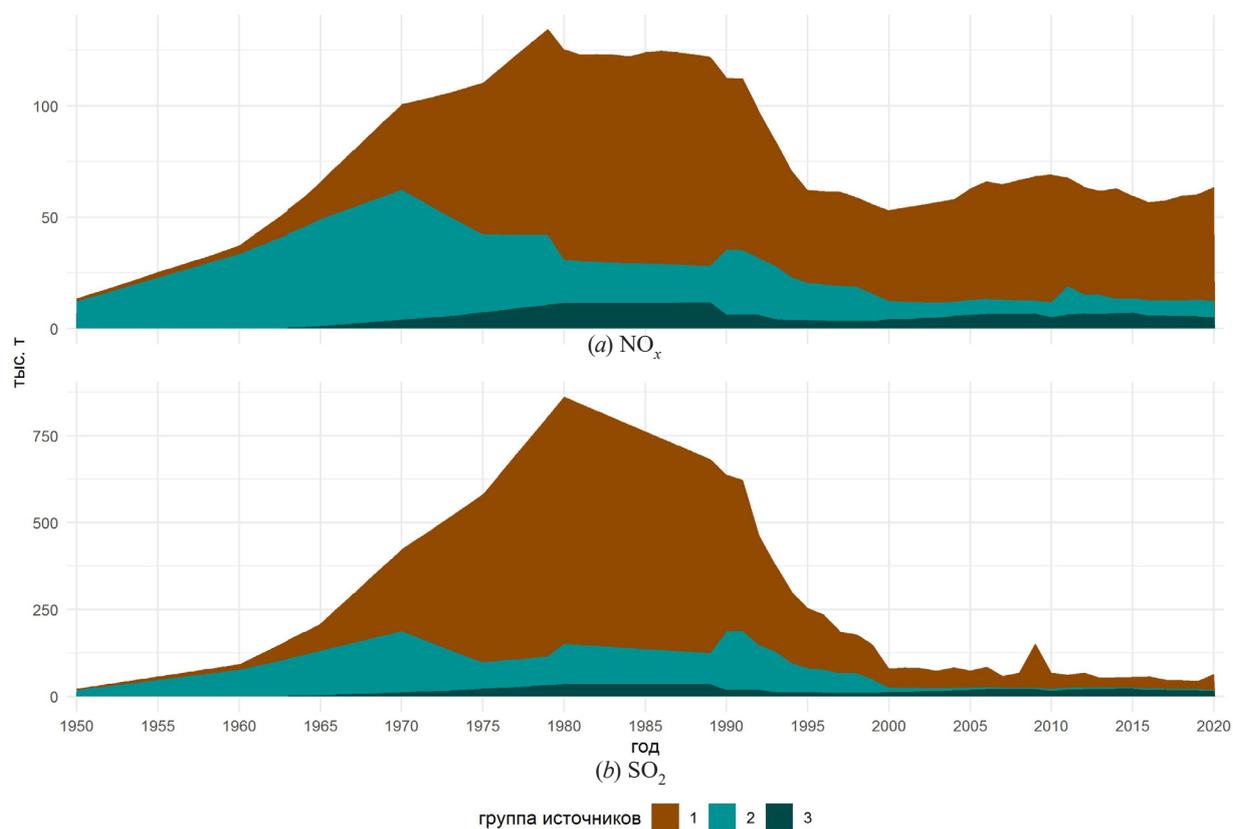


Рис. 2. Динамика выбросов оксидов азота (а) и диоксида серы (б) и от стационарных источников с 1950 по 2020 г., тыс. т: 1 – энергетика и промышленные процессы, 2 – жилищно-коммунальное хозяйство и бытовой сектор, 3 – переработка, транспортировка и распределение топлив

Fig. 2. Dynamics of nitrogen oxides (a) and sulfur dioxide (b) emissions from stationary sources from 1950 to 2020, thousand tons: 1 – energy and industrial processes, 2 – household sector and communal services, 3 – processing, transportation and distribution of fuels

период сокращения выбросов, продолжившийся вплоть до стабилизации на уровне 60–80 тыс. т/год начиная с 2000 г. Основной причиной снижения уровня выбросов диоксида серы в этот период явилось сокращение использования в качестве топлива каменного угля и мазута. В последующий период выбросы характеризовались в основном медленным сокращением до уровня 45–55 тыс. т/год по мере дальнейшего замещения в топливном балансе каменного угля и мазута природным газом, с пиком в 2009 г. вследствие резкого увеличения в данном году использования мазута электростанциями.

Полученные оценки по направлению динамики соответствуют статистическим данным [1; 7], согласно которым произошло сокращение выбросов между 1980 и 2000 г. в 5,2 раза. Вместе с тем по данным статистического учета наблюдается более низкий максимум годовых выбросов в течение рассматриваемого периода (761 тыс. т.), что объясняется применением в выполненной нами работе более широкого перечня категорий источников, включая бытовое сжигание топлива и малые установки сжигания, не учитываемые статистикой о выбросах. Кроме того, в представленной в данном исследовании оценке выявлено более раннее начало периода сокращения выбросов.

За рассматриваемый период структура выбросов диоксида азота от стационарных источников с учетом значительных изменений в топливном балансе в разрезе видов топлив претерпела значительные изменения. В 1950-х годах 64,9 % выбросов SO_2 от рассматриваемых источников было связано со сжиганием торфа и топливных брикетов. В последующие годы по мере роста потребления мазута его вклад в выбросы диоксида серы увеличивался, достигнув на максимуме в 1990 г. 88,6 %. К настоящему времени сжигание мазута формирует 53,4 % выбросов SO_2 .

Оксиды азота. Выбросы оксидов азота характеризовались быстрым ростом до 1979 г. (с 7,5 до 134,5 тыс. т/год), связанным с общим ростом потребления топлива (рис. 2). В 1980-е годы рост прекратился, далее наблюдалось сохранение уровня выбросов (122,1–124,3 тыс. т) вплоть до начала 1990-х годов, когда произошло относительно резкое снижение количества выбрасываемых NO_x от стационарных источников в стране. После 2000 г. выбросы характеризуются слабовыраженной и неустойчивой тенденцией к росту. Максимум в этот период отмечен в 2010 г. (69,7 тыс. т), минимум – в 2017 г. (57,4 тыс. т). Получена сходная динамика с данными статистического учета, абсолютные уровни выбросов отличаются в силу более полного учета источников в представленной в данном сообщении инвентаризации.

Изменение структуры выбросов оксидов азота соответствует динамике топливного баланса страны за рассматриваемый период. В 1950 г. 77,8 % выбросов NO_x было связано со сжиганием торфа и топливных брикетов. К 1970 г. вклад торфа снизился до 22,4 %, произошло увеличение вклада угля (34,2 %) и мазута (25,3 %). По мере роста потребления мазута, со сжиганием этого вида топлива стала связана большая часть выбросов NO_x от стационарных источников. Максимум вклада мазута в выбросы NO_x отмечен в 1980 г. (64,3 %). В настоящее время практически половина (45,8 %) выбросов NO_x от стационарных источников обусловлена процессами, напрямую не связанными со сжиганием топлива, среди видов топлива наибольший вклад в выбросы NO_x вносит природный газ, составляющий основу топливного баланса страны.

В динамике выбросов оксидов азота и диоксида серы от стационарных источников в Беларуси наблюдаются сходные черты, связанные со значительным сходством в источниках выбросов, наиболее выраженные до начала 2000-х годов. В частности, наблюдался интенсивный рост с начала рассматриваемого периода вплоть до конца 1970 – начала 1980-х годов, сменившийся сокращением сначала малой интенсивности, усилившейся в начале 1990-х годов, и последующей стабилизацией. Выявленные различия в динамике выбросов этих поллютантов состоят в большей интенсивности межгодового изменения для диоксида серы. После 2000 г. межгодовые колебания выбросов диоксида серы находились в диапазоне от –55,4 до +122,1 %, тогда как оксидов азота – от –6,2 до +8,5 %. Принимаемые меры, изменение структуры используемого топлива и общеэкономические изменения привели к сокращению выбросов в конце рассматриваемого периода относительно выявленного максимума в 2,1 раз для оксидов азота и в 15,8 раз для диоксида серы.

Анализ показал, что оценки выбросов диоксида серы в наборах данных CEDS близки нашим оценкам лишь для небольших отрезков временного ряда: с 1995 по 1999 г. и с 2010 по 2014 г. (рис. 3). Весь период с 1950 г. и вплоть до конца 1970-х годов согласно оценкам CEDS выбросы диоксида серы от стационарных источников в Беларуси составляли более 400 тыс. т; максимальных значений (около 1 млн т) выбросы достигли в 1973 г. Основные источники выбросов – энергетика, промышленное сжигание топлива, бытовое сжигание, металлургия. Оценки выбросов для большей части этого периода явно завышены, и в особенности для 1950–1960-х годов. Согласно нашим оценкам, выбросы диоксида серы до начала 1960-х не превышали 80 тыс. т, до начала 1970-х – 400 тыс. т. Максимального уровня – свыше 800 тыс. т выбросы достигли в 1979–1983 гг. Основной вклад в выбросы серы вносит сжигание мазута и угля, а также нефтепереработка, интенсивность которых быстро возрастала в 1960–1970-е годы и достигла максимума в начале 1980-х годов. До этого основное место в топливном балансе занимал торф; он содержит мало серы и выбросы диоксида серы при сжигании этого топлива невелики.

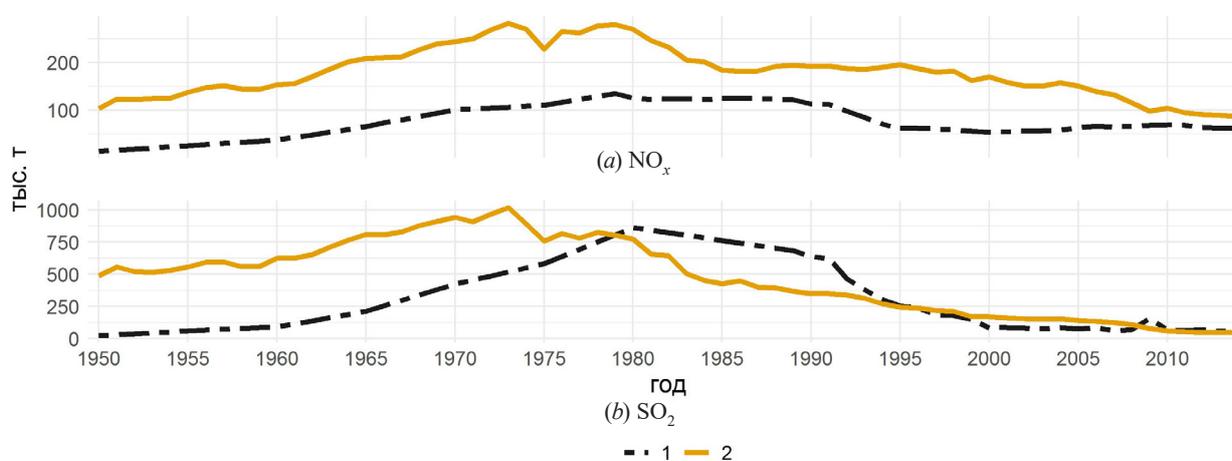


Рис. 3. Выбросы оксидов азота (а) и диоксида серы (б) на территории Беларуси от стационарных источников согласно набору данных CEDS (1) и выполненным расчетам (2), тыс. т

Fig. 3. Nitrogen oxides (a) and sulfur dioxide (b) emissions in Belarus from stationary sources according to the CEDS dataset (1) and calculations performed (2), thousand tons

Оценки выбросов оксидов азота от стационарных источников практически для всего периода с 1950 года в CEDS завышены относительно полученных в настоящем исследовании оценок (рис. 3). Современные выбросы в CEDS выше примерно на 1/3 (86 тыс. т против 62 тыс. т по нашим оценкам). Различия в оценках для периода с 1990-х – до середины 2000-х годов составляют 2–3 раза. Различаются как уровни выбросов, так и их тренды.

Согласно CEDS, выбросы оксидов азота постепенно росли с 1950 по 1973 г. (со 103,4 тыс. т в 1950 г. до 282,6 тыс. т в 1973 г.). После некоторого спада они достигли нового максимума (279,7 тыс. т в 1979 г.), снизились до 181,6 тыс. т в 1986 г., к 1990 г. несколько возросли (до 192 тыс. т). Выбросы оксидов азота согласно CEDS монотонно сокращались после 1990 г.; в 1990 г. они достигли одного из максимумов (159 тыс. т), после чего относительно равномерно снижались вплоть до 2014 г. Тренды NO_x практически не коррелируют с трендами SO₂ и CO, что также вызывает сомнения.

По нашим оценкам, выбросы NO_x от стационарных источников в начале 1950-х годов составляли лишь 13,5–22,9 тыс. т, что в 5–7 раз меньше, чем по оценкам CEDS. Максимального уровня выбросы достигли в 1979 г. (134,5 тыс. т/год), впоследствии начался период резкого сокращения, продолжавшийся до 2000 г. (53,1 тыс. т); а далее происходит медленный рост выбросов.

Заключение. Таким образом, выполненные расчеты впервые позволили получить научно обоснованные оценки выбросов в Беларуси диоксида серы и оксидов азота от основных стационарных источников выбросов за период с 1950 по 2020 г., что суммарно позволило реконструиро-

вать ряд протяженностью 71 год. Установлено, что наиболее совершенная к настоящему времени система оценивания исторических выбросов CEDS – коллективный труд многих научных групп – содержит оценки выбросов загрязняющих веществ невысокой точности применительно к Беларуси. Источниками основных погрешностей оценок выбросов в CEDS являются: недостаточно точные данные о деятельности в современный период; экстраполяция современных характеристик деятельности на прошлое (например, производства стали, использования угля как топлива и др.); экстраполяция на Беларусь без учета развития экономики трендов деятельности по секторам, характерных для других стран Европы.

Дальнейшие исследования будут направлены на уточнение полученных оценок выбросов, дополнение их оценками пространственно распределенных выбросов.

Благодарности. Работа выполнена в рамках задания Подпрограммы 1 «Природные ресурсы и их рациональное использование» ГПНИ «Природные ресурсы и окружающая среда» на 2021–2025 гг. (№ госрегистрации 20192480).

Acknowledgements. The study has been performed within the Task of the Subprogram 1 “Natural resources and their rational use” of the State Program of Scientific Investigations “Natural Resources and Environment” for 2021–2025 (State registration No. 20192480).

Список использованных источников

1. The Emissions Database / EMEP Centre on Emissions Inventory and Projections [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.ceip.at/webdab-emission-database/reported-emissiondata>. – Date of access: 14.03.2023.
2. Historical (1850–2000) gridded anthropogenic and biomass burning emissions of reactive gases and aerosols: methodology and application / J. Lamarque [at el.] // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2010. – Vol. 10, N 15. – P. 7017–7039. <https://doi.org/10.5194/acp-10-7017-2010>
3. A 1°×1° resolution data set of historical anthropogenic trace gas emissions for the period 1890–1990 / J. A. van Aardenne [et al.] // *Global Biogeochemical Cycles*. – 2001. – Vol. 15, N 4. – P. 909–928. <https://doi.org/10.1029/2000gb001265>
4. Schultz, M. G. Reanalysis of the tropospheric chemical composition over the past 40 years: Final report / M. G. Schultz. – 2007. – 122 p.
5. Топливо-энергетический баланс Белорусской ССР: стат. сб. / Центр. стат. упр. при Совете Министров Белорус. ССР. – Минск, 1977. – 247 с.
6. Топливо-энергетический баланс Белорусской ССР: стат. сб. / Центр. стат. упр. Совета Министров Белорус. ССР. – Минск, 1982. – 172 с.
7. Интерактивная информационно-аналитическая система распространения официальной статистической информации [Электронный ресурс] / Нац. стат. комитет Респ. Беларусь. – Режим доступа: <https://dataportal.belstat.gov.by/>. – Дата доступа: 22.01.2022.
8. Экономическая география Белоруссии / под общ. ред. С. М. Мельничука. 3-е изд., перераб. и доп. – Минск, 1982. – 224 с.
9. EMEP/EEA. 2019. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019. Technical guidance to prepare national emission inventories [Electronic resource] // European Environment Agency, Copenhagen. – 2019. – Mode of access: <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-1-energy-industries/view>. – Date of access: 02.05.2020.
10. AP-42: Compilation of Air Emissions Factors from Stationary Sources [Electronic resource] // EPA. U. S. Environmental Protection Agency. – Mode of access: <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-compilation-air-emissions-factors-stationary-sources>. – Date of access: 14.03.2023.

References

1. *The Emissions Database / EMEP Centre on Emissions Inventory and Projections*. Available at: <https://www.ceip.at/webdab-emission-database/reported-emissiondata> (accessed 14 March 2023).
2. Lamarque J.-F., Bond T. C., Eyring V., Granier C., Heil A., Klimont Z., Lee D., Liousse C., Mieville A., Owen B., Schultz M. G., Shindell D., Smith S. J., Stehfest E., Aardenne J. A., Cooper O. R., Kainuma M., Mahowald N., McConnell J. R., Naik V., Riahi K., van Vuuren D. P. Historical (1850–2000) gridded anthropogenic and biomass burning emissions of reactive gases and aerosols: methodology and application. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, vol. 10, no. 15, pp. 7017–7039. <https://doi.org/10.5194/acp-10-7017-2010>
3. van Aardenne J. A., Dentener F. J., Olivier J. G. J., Goldewijk C. G. M. K., Lelieveld J. A 1°×1° resolution data set of historical anthropogenic trace gas emissions for the period 1890–1990. *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, vol. 15, no. 4, pp. 909–928. <https://doi.org/10.1029/2000gb001265>
4. Schultz M. G. *Reanalysis of the tropospheric chemical composition over the past 40 years: Final report*. 2007. 122 p.
5. *Fuel and energy balance of the Byelorussian SSR: statistical yearbook*. Minsk, 1977. 247 p. (in Russian).
6. *Fuel and energy balance of the Byelorussian SSR: statistical yearbook*. Minsk, 1982. 172 p. (in Russian).
7. Interactive information and analytical system for dissemination of official statistical information. *National Statistical Committee of the Republic of Belarus*. Available at: <https://dataportal.belstat.gov.by/> (accessed 22 January 2022) (in Russian).

8. Melnichuk S. M., ed. *Economic Geography of Belarus*. 3rd ed. Minsk, 1982. 224 p. (in Russian).

9. EMEP/EEA. 2019. *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019. Technical guidance to prepare national emission inventories*. Available at: <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-1-energy-industries/view> (accessed 2 May 2020).

10. AP-42: Compilation of Air Emissions Factors from Stationary Sources. *EPA. U. S. Environmental Protection Agency*. Available at: <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-compilation-air-emissions-factors-stationary-sources> (accessed 14 March 2023).

Информация об авторах

Какарека Сергей Витальевич – д-р техн. наук, профессор, заведующий лабораторией. Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, Минск, Республика Беларусь). E-mail: sk001@yandex.ru.

Круковская Ольга Юрьевна – канд. геогр. наук, ст. науч. сотрудник. Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220114, Минск, Республика Беларусь). E-mail: o-krukowskaya@tut.by.

Information about the authors

Kakareka Sergey V. – D. Sc. (Engineering), Professor, Head of the Laboratory. Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skorina Str., 220076, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sk001@yandex.ru.

Krukowskaya Olga Yu. – Ph. D. (Geography), Senior Researcher. Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skorina Str., 220114, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: o-krukowskaya@tut.by.

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

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ
TECHNICAL SCIENCES

УДК 621.983.044
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2024-68-5-413-420>

Поступило в редакцию 16.09.2024
Received 16.09.2024

А. И. Покровский¹, Б. Б. Хина¹, Йонг Сю², Ши-Хонг Жанг², Баоченг Янг²

¹Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

²Институт исследования металлов Китайской академии наук,
Шеньян, Китайская Народная Республика

**ВЛИЯНИЕ БОЛЬШИХ СКОРОСТЕЙ ДЕФОРМАЦИИ
НА МЕХАНИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ И СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ
ТИТАНОВОГО СПЛАВА Ti-6Al-4V**

(Представлено академиком А. П. Ласковнёвым)

Аннотация. Исследовано механическое поведение и структурообразование листовых образцов титанового сплава Ti-6Al-4V. Сравнивали медленную (квазистатическую) деформацию со скоростью $\dot{\epsilon} = 0,001, 0,01, 0,1$ и 1 c^{-1} и быструю (динамическую) деформацию по методу Хопкинсона с $\dot{\epsilon} = 1290, 2066, 3567$ и 3828 c^{-1} . Определены особенности механизма структурообразования сплава Ti-6Al-4V при высокоскоростной деформации ($\approx 3800 \text{ c}^{-1}$), заключающиеся в том, что наряду со скольжением дислокаций развивается двойникование, изменяются характеристики текстуры, присутствующей в исходном листовом материале, происходит пластическая деформация как по всему объему зерен α -фазы, так и зерен β -фазы (в то время как в квазистатическом режиме происходит в основном пластическая деформация зерен α -фазы), формируются дислокационные скопления и ячейки внутри зерен, что свидетельствует об интенсивном взаимодействии дислокаций. Установленные механизмы приводят к существенному повышению технологической пластичности титанового сплава при гидроударной штамповке по сравнению с квазистатической деформацией.

Ключевые слова: структура, текстура, дислокации, титановый сплав Ti-6Al-4V, скорость деформации, гидроударная штамповка

Для цитирования. Влияние больших скоростей деформации на механическое поведение и структурообразование титанового сплава Ti-6Al-4V / А. И. Покровский [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2024. – Т. 68, № 5. – С. 413–420. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2024-68-5-413-420>

Artur I. Pokrovsky¹, Boris B. Khina¹, Yong Xu², Shi-Hong Zhang², Baocheng Yang²

¹Physical-technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

²Institute of Metals Research of the Chinese Academy of Sciences, Shenyang, People's Republic of China

**EFFECT OF HIGH STRAIN RATES ON THE MECHANICAL BEHAVIOR AND STRUCTURE
FORMATION OF THE TITANIUM ALLOY Ti-6Al-4V**

(Communicated by Academician Alexander P. Laskovnev)

Abstract. The mechanical behavior and structure formation of sheet specimens of the titanium alloy Ti-6Al-4V is studied. Low strain rate (quasi-static) deformation at $\dot{\epsilon} = 0.001, 0.01, 0.1$ and 1 s^{-1} is compared with fast (dynamic) deformation performed using the Hopkinson method with $\dot{\epsilon} = 1290, 2066, 3567$, and 3828 s^{-1} . The features of the structure formation mechanism of the titanium alloy Ti-6Al-4V under high-strain-rate ($\approx 3800 \text{ s}^{-1}$) deformation have been determined, namely that along with the dislocation glide, the twinning develops, the characteristics of texture present in the original sheet material undergo changes, plastic deformation occurs throughout the entire volume of the α -phase and β -phase grains (while in the quasi-static mode, mainly plastic deformation of the α -phase grains takes place), dislocation pile-ups and cells inside the grains are formed, which points to intensive interaction of dislocations. The established mechanisms lead to a substantial increase in technological plasticity of the titanium alloy during impact hydroforming as compared to quasi-static deformation.

Keywords: structure, texture, dislocations, titanium alloy Ti–6Al–4V, strain rate, impact hydroforming

For citation. Pokrovsky A. I., Khina B. B., Yong Xu, Shihong Zhang, Baocheng Yang. Effect of high strain rates on the mechanical behavior and structure formation of the titanium alloy Ti–6Al–4V. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2024, vol. 68, no. 5, pp. 413–420 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2024-68-5-413-420>

Введение. Одной из актуальных проблем в области материаловедения и технологий обработки металлов давлением является анализ влияния скорости пластической деформации $\dot{\epsilon} = d\epsilon / dt$, где ϵ – степень деформации, на структурообразование металлов и сплавов. Эта проблема тесно связана с повышением технологической пластичности листовых материалов, особенно современных высокопрочных и труднодеформируемых сплавов. При традиционном прессовании на гидравлических и механических прессах имеет место медленная (квазистатическая) деформация, когда $\dot{\epsilon}$ не превышает $0,1\text{--}1\text{ с}^{-1}$. При высокоскоростной импульсной (динамической) деформации, которая реализуется в условиях гидроударной штамповки (ГУШ), разработанной в ФТИ НАН Беларуси с использованием промежуточных сред (станочная эмульсия или полиуретан) [1; 2], значение $\dot{\epsilon}$ составляет $\sim 10^3\text{ с}^{-1}$. В литературе показано, что при динамической деформации изменяется механическое поведение металлов, т. е. кривые «напряжение–деформация» [3]. При этом возможно существенное изменение механизмов деформации и структурообразования, например, протекание динамического возврата, появление двойникования и другие необычные явления в материалах, где при медленной деформации имеет место только скольжение дислокаций [1].

Из вышеизложенного вытекает цель данной работы: выполнить сравнительные исследования механического поведения, эволюции микроструктуры, дислокационного ансамбля и механизмов структурообразования при переходе от медленной к высокоскоростной деформации на примере гидроударной штамповки титанового сплава Ti–6Al–4V (TC4). Это позволит определить причины экспериментально наблюдаемого повышения технологической пластичности металлов при ГУШ.

Материалы и методы исследования. Химический состав титанового сплава следующий (мас. %): основа – титан, 5,99 Al, 4,04 V, 0,09 Fe, 0,024 C, 0,016 N, 0,0073 H, 0,14 O. Этот сплав марки Ti–6Al–4V по ISO 24034:2010 (в Китае маркируется как TC4) относится к группе конструктивных высокопрочных деформируемых сплавов и имеет двухфазную ($\alpha + \beta$)-структуру, где высокотемпературная β -фаза титана стабилизирована за счет легирования алюминием и ванадием. Его полным аналогом является сплав ВТ6с по ГОСТ 19807–91, широко применяемый в аэрокосмической промышленности.

Структуру и деформационное поведение сплава изучали в состоянии поставки без дополнительной термообработки. Исследование механического поведения сплава, т. е. получение зависимостей «напряжение–деформация», выполняли на разрывной машине (медленная деформация растяжения при $\dot{\epsilon} = 0,001, 0,01, 0,1$ и 1 с^{-1}) и по методу Хопкинсона, описанному в [1] (динамическая деформация при $\dot{\epsilon} = 1290, 2066, 3567$ и 3828 с^{-1}).

Для структурных исследований использовали сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) Inspect F50 фирмы FEI Europe B.V. PO., Нидерланды, с приставкой для анализа дифракции обратно рассеянных электронов (Electron BackScatter Diffraction – EBSD) фирмы Oxford Instruments. Микроскоп обладает следующим разрешением во вторичных электронах: 1 нм при ускоряющем напряжении 15 кВ, 1,7 нм при 1 кВ, 4,0 нм при 100 кВ. Метод EBSD позволяет исследовать текстуру металлического материала, определить распределение средней разориентации зерен и визуализировать скопления дислокаций у границ или внутри зерен [4]. Для анализа дислокационной структуры использовали просвечивающий электронный микроскоп (ПЭМ) Tecnai G2 F20 той же фирмы.

Результаты и их обсуждение. Влияние скорости нагружения на механическое поведение сплава Ti–6Al–4V. На рис. 1 представлены кривые «напряжение–деформация» для разных значений $\dot{\epsilon}$ в квазистатическом (рис. 1, а) и динамическом (рис. 1, б) режимах [5].

Как видно из рис. 1, а в области медленных скоростей деформации имеется незначительное различие в степени деформационного упрочнения (всего на несколько процентов). При динамической

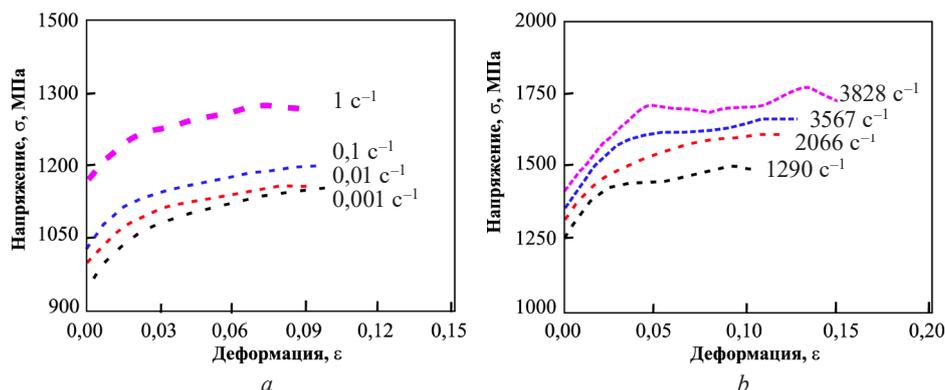


Рис. 1. Кривые «напряжение–деформация» для титанового сплава Ti–6Al–4V: $a - \dot{\epsilon} = 0,001, 0,01, 0,1$ и 1 с^{-1} (квазистатические испытания); $b - \dot{\epsilon} = 1290, 2066, 3567$ и 3828 с^{-1} (динамические испытания)

Fig. 1. Stress-strain curves for titanium alloy Ti–6Al–4V: $a - \dot{\epsilon} = 0,001, 0,01, 0,1$ and 1 s^{-1} (quasi-static tests); $b - \dot{\epsilon} = 1290, 2066, 3567$ and 3828 s^{-1} (dynamic tests)

деформации наблюдается рост как прочностных, так и пластических характеристик – соответственно в 1,47 и 1,67 раза по сравнению со скоростью деформации $0,1 \text{ с}^{-1}$ (рис. 1, *b*).

Испытания на формуемость при медленной и быстрой деформации осуществляли, используя пробу Эриксона [6; 7]: заготовка, прижатая к наружной поверхности матрицы, выдавливается пуансоном с шарообразным наконечником до образования первой трещины. Отношение глубины лунки h к исходному диаметру заготовки d является мерой технологической пластичности (т. е. штампуемости). Установлено, что с увеличением скорости деформирования имеет место существенное повышение штампуемости титанового сплава Ti–6Al–4V: при гидроударном нагружении величина h/d увеличивается примерно в 1,89 раза по сравнению с квазистатической деформацией [8].

Микроструктурные исследования причин повышения пластичности титанового сплава при динамическом нагружении. По данным РФА, сплав состоит из α - и β -фаз в следующем количественном соотношении в исходном состоянии: 82,7 % α и 17,3 % β . Более мелкие зерна размером 2–3 мкм, часто неправильной формы, представляют собой β -фазу. Они располагаются преимущественно по границам (и иногда внутри) более крупных (3–5 мкм) зерен α -фазы. Деформационно-индуцированных фазовых превращений не обнаружено.

На рис. 2 приведены микроструктуры титанового сплава, полученные методом СЭМ с EBSD, для малой скорости деформации $\dot{\epsilon} = 1 \text{ с}^{-1}$ (рис. 2, *a*) и для деформации в динамическом режиме при $\dot{\epsilon} = 3828 \text{ с}^{-1}$ (рис. 2, *b*), также распределение средней разориентации ядер зерен (Kernel Average Misorientation – KAM) в исходном листе титанового сплава (рис. 2, *c*) и после деформации в двух указанных режимах (рис. 2, *d, e*).

По данным EBSD, при малой скорости деформации в листовом материале, как и в исходном образце, имеется текстура в базисной кристаллографической плоскости $(0\ 0\ 0\ 1)$ ГПУ-решетки, и при медленной деформации она незначительно уменьшается. При высокой скорости деформации текстура в базисной плоскости несколько увеличивается и при этом также формируется текстура в призматической плоскости $(0\ 1\ \bar{1}\ 0)$. Это свидетельствует о несколько более однородной деформации заготовки в трехмерном пространстве, что является одной из возможных причин повышения технологической пластичности титанового сплава.

На рис. 2, *c–e* различная ориентация ядер зерен выделена разным цветом: желтым, синим, голубым. Видно, что в исходном сплаве (рис. 2, *c*) и при малой скорости деформации (рис. 2, *d*) средняя разориентация ядер меньше, чем после динамической деформации (рис. 2, *e*).

При исследовании методом EBSD выявлено также распределение скоплений дислокаций внутри зерен разных фаз титанового сплава (рис. 3).

Видно, что в исходном сплаве в состоянии поставки, т. е. после прокатки, в отдельных зернах α -фазы присутствуют скопления дислокаций у границ зерен (рис. 3, *a*), в то время как в зернах β -фазы они не наблюдаются (рис. 3, *d*). После медленной (квазистатической) деформации такие

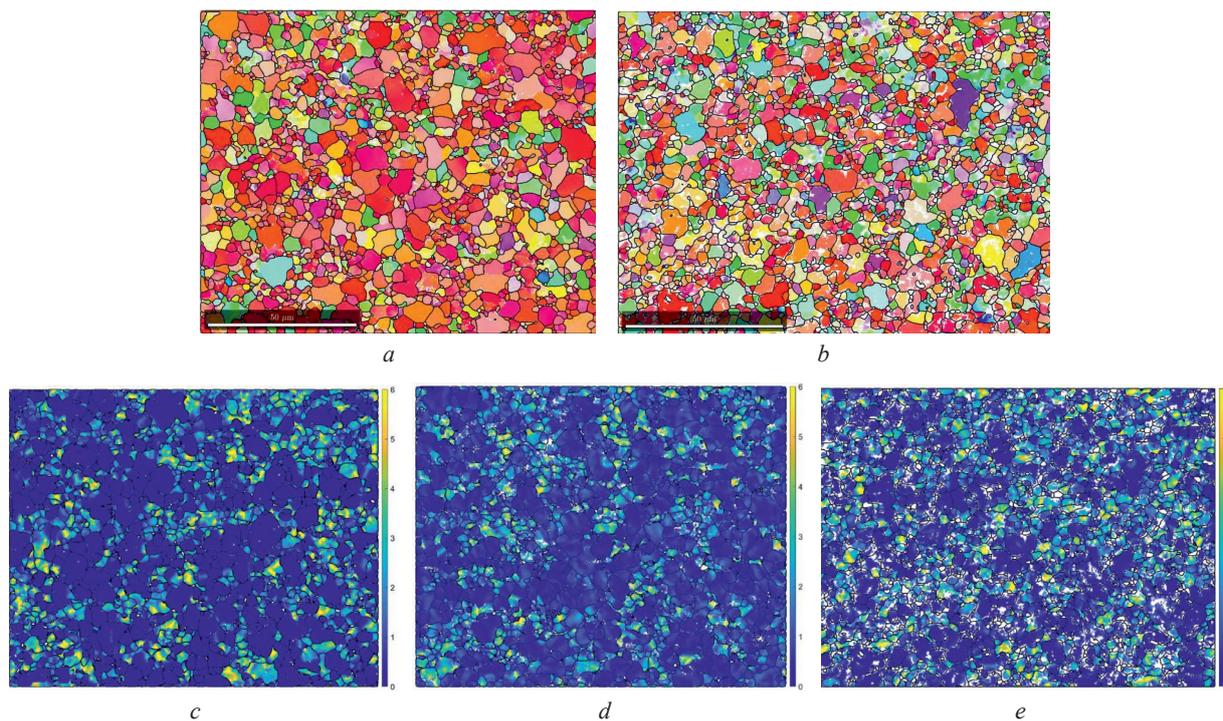


Рис. 2. Микроструктуры деформированного титанового сплава по данным СЭМ с EBSD и распределение средней разориентации ядер зерен (Kernel Average Misorientation – KAM): *a* – после квазистатической деформации; *b* – после динамической деформации; *c* – KAM в исходном листе; *d* – KAM после квазистатической деформации; *e* – KAM после динамической деформации

Fig. 2. Microstructure of deformed titanium alloy according to SEM with EBSD and kernel average misorientation (KAM): *a* – after quasi-static deformation; *b* – after dynamic deformation; *c* – KAM in initial sheet; *d* – KAM after quasi-static deformation; *e* – KAM after dynamic deformation

скопления дислокаций у границ наблюдаются в большом числе зерен α -фазы, а их форма и размеры меняются (рис. 3, *b*). В то же время в зернах β -фазы скопления дислокаций не выявлены, их форма почти не меняется, а размеры в плоскости шлифа уменьшаются (рис. 3, *e*) по сравнению с исходным состоянием (рис. 3, *d*). Такой характер деформации зерен α -фазы может быть объяснен с использованием механизма Коттрелла, описывающего эстафетную передачу деформации от одного зерна к другому в поликристаллах [9], и отдельных положений теории Мейерса–Эшворта [10]. Поскольку высокоугловые границы зерен в общем случае являются непреодолимыми препятствиями для дислокаций, при начале пластической деформации дислокации, скользящие в одном зерне, скапливаются у границы с соседним. Возникающие поля внутренних напряжений приводят к торможению работы источников Франка–Рида в данном зерне и иницированию их работы в соседнем зерне вблизи границы. При достаточно высоких напряжениях иницируется большое число таких источников. Кроме того, в некоторых случаях возможна генерация новых дислокаций самой границей зерен. В результате этого в приграничных областях зерен развивается множественное скольжение. При этом из-за пересечения дислокаций образуется большое число стопоров (locks), которые препятствуют дальнейшему скольжению дислокаций в глубь зерен, что и приводит к образованию скоплений дислокаций в приграничных объемах. В результате происходит неоднородная деформация по телу зерен – преимущественно деформируются приграничные области. Кроме того, в процессе деформации определенную роль может играть зернограничное проскальзывание.

После быстрой (динамической) деформации в процессе гидроударного воздействия зерна α -фазы становятся вытянутыми, т. е. сильно деформированными, а скопления дислокаций у их границ наблюдаются в значительно меньшем числе зерен (рис. 3, *c*) по сравнению с квазистатическим случаем (рис. 3, *b*). При этом форма зерен β -фазы также меняется – они становятся вытянутыми (рис. 3, *f*).

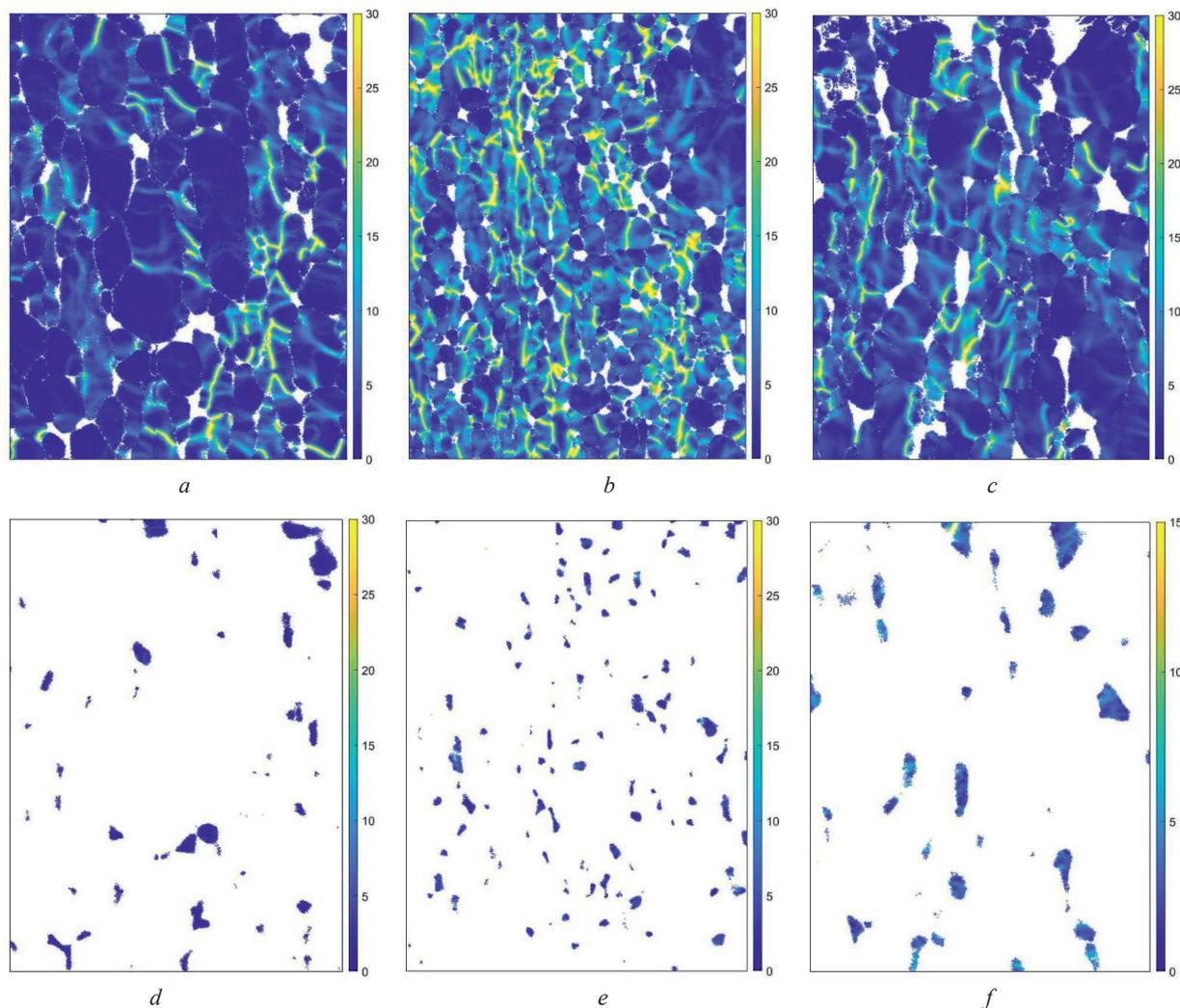


Рис. 3. Скопления дислокаций (желтый цвет) в зернах разных фаз сплава Ti–6Al–4V: *a* – исходный сплав, зерна α -фазы; *b* – квазистатическая деформация, зерна α -фазы; *c* – динамическая деформация, зерна α -фазы; *d* – исходный сплав, зерна β -фазы; *e* – квазистатическая деформация, зерна β -фазы; *f* – динамическая деформация, зерна β -фазы

Fig. 3 Dislocation pileups in grains of different phases in alloy Ti–6Al–4V: *a* – initial alloy, α -phase grains; *b* – quasi-static deformation, α -phase grains; *c* – dynamic deformation, α -phase grains; *d* – initial alloy, β -phase grains; *e* – quasi-static deformation, β -phase grains; *f* – dynamic deformation, β -phase grains

Таким образом, в квазистатическом режиме происходит в основном пластическая деформация зерен α -фазы и при этом во многих зернах протекает преимущественная деформация в областях, прилегающих к границам, в то время как зерна β -фазы почти не деформируются. В динамическом режиме механизм деформации изменяется: поскольку скопления дислокаций у границ наблюдаются в небольшом числе зерен, то имеет место скольжение дислокаций и, соответственно, пластическая деформация по всему объему зерен α -фазы. При этом происходит существенная деформация и зерен β -фазы – они вытягиваются в направлении течения сплава. Обнаруженные закономерности, а именно вовлечение зерен β -фазы в пластическую деформацию, также обуславливают повышение технологической пластичности титанового сплава при динамическом нагружении.

Сравнительные исследования титанового сплава на просвечивающем электронном микроскопе. На рис. 4 показаны дислокационные субструктуры исходной листовой заготовки (рис. 4, *a*) и после квазистатической (рис. 4, *b*) и динамической деформации (рис. 4, *c–e*). Видно, что в исходном образце плотность дислокаций низкая (рис. 4, *a*). После квазистатической деформации

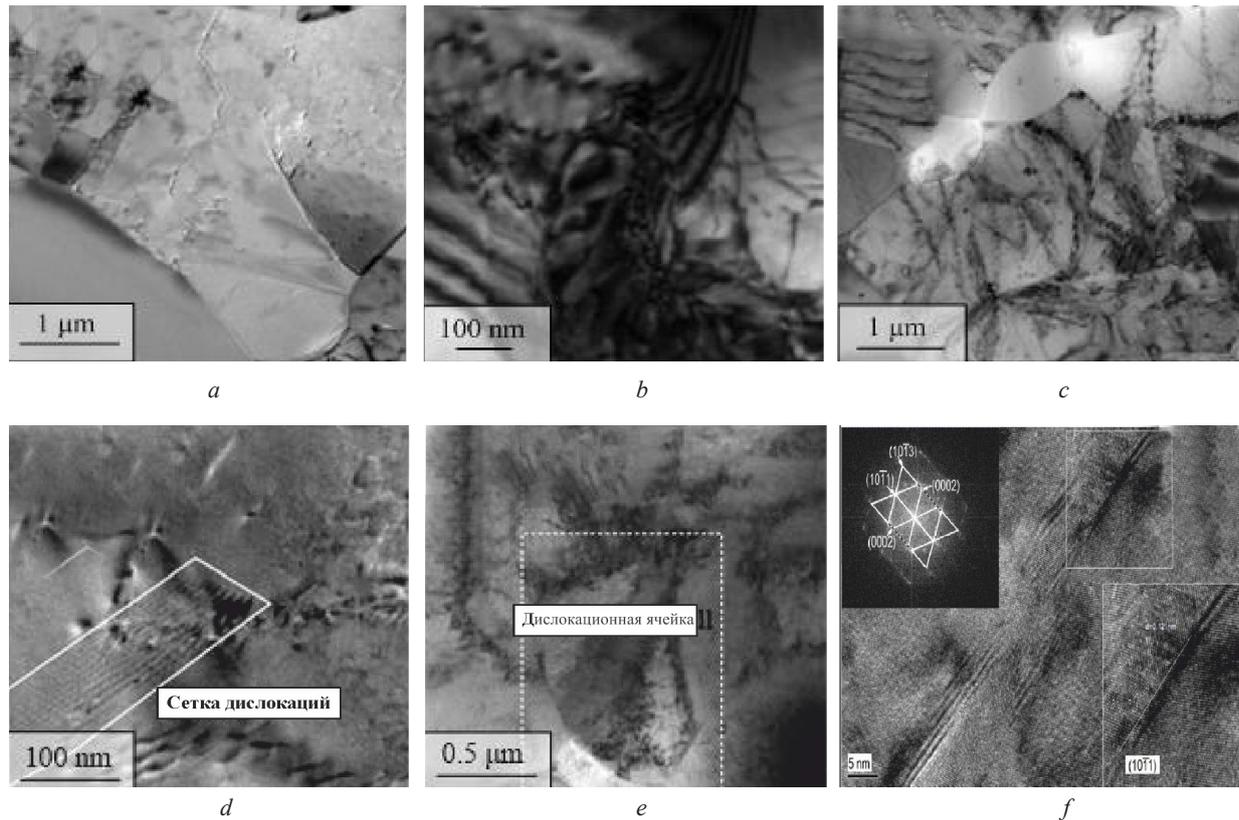


Рис. 4. Дислокационная субструктура и двойники в сплаве Ti–6Al–4V (ПЭМ): *a* – исходная заготовка; *b* – квазистатическая деформация; *c–e* – динамическая деформация; *f* – микродвойники после динамической деформации

Fig. 4. Dislocation substructure and twins in alloy Ti–6Al–4V (transmission electron microscopy): *a* – initial blank; *b* – quasi-static deformation; *c–e* – dynamic deformation; *f* – microtwins after dynamic deformation

в зернах происходит размножение и перераспределение дислокаций (рис. 4, *b*), что согласуется с данными, полученными методом EBSD, а у границ зерен появляются полосы сдвига (рис. 4, *b*).

После динамической деформации в зернах α -фазы возле границ имеет место генерация и размножение дислокаций, что обеспечивает деформацию этой фазы, в то время как в β -фазе плотность дислокаций ниже (рис. 4, *c*). Это также согласуется с результатами EBSD-анализа. При больших увеличениях заметны дислокационные сетки и ячейки (рис. 4, *d, e*), что говорит об интенсивном взаимодействии дислокаций между собой и с другими препятствиями – например, с границами зерен. При еще большем увеличении обнаружено, что в определенных локальных зонах в середине зерен появляются микродвойниковые структуры, а также небольшие двойниковые полосы (рис. 4, *f*). На врезке (рис. 4, *f*) показана ориентация двойника и его кристаллографическая структура. Плоскость двойникового (габитуса) $[1\ 0\ \bar{1}\ 1]$.

Таким образом, развитие двойникового наряду с дислокационным механизмом пластической деформации при высокоскоростном нагружении также является одной из причин повышения пластичности листовых заготовок титанового сплава Ti–6Al–4V в условиях гидроударной штамповки.

Выводы.

1. Показано, что динамическое нагружение, характерное для гидроударной штамповки, приводит к изменению как механического поведения титанового сплава Ti–6Al–4V, так и механизма структурообразования при деформации, что в конечном итоге обеспечивает существенное улучшение технологической пластичности.

2. Установлены особенности механизма структурообразования сплава Ti–6Al–4V во время пластической деформации при высоких скоростях ($\approx 3800\text{ с}^{-1}$) в процессе гидроударного воздействия, заключающиеся в том, что:

изменяются характеристики текстуры материала по сравнению со случаем медленной (квазистатической) деформации,

скопления дислокаций у границ сильно деформированных зерен α -фазы наблюдаются в значительно меньшем числе зерен по сравнению с квазистатическим случаем,

происходит пластическая деформация как зерен α -фазы, так и зерен β -фазы, в то время как в квазистатическом режиме происходит в основном пластическая деформация только зерен α -фазы,

формируются дислокационные сетки и ячейки, что свидетельствует об интенсивном взаимодействии дислокаций между собой и с другими препятствиями в объеме зерен при динамической деформации,

наряду со скольжением дислокаций развивается двойникование.

Таким образом, полученные экспериментальные результаты открывают новые перспективы практического применения методов высокоскоростной импульсной деформации, таких как гидроударная штамповка, вследствие повышения технологической пластичности материала. При этом расширяются возможности получения за одну операцию тонкостенных изделий сложной формы, которые требуют значительных степеней деформации, из листовых заготовок. Это важно, в частности, для деталей аэрокосмической техники.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант Т24КИТГ-014/2024УФЕ0108800).

Acknowledgements. The work was carried out with the financial support of the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (grant no. T24KITG-014/2024UFE0108800).

Список использованных источников

1. Влияние скорости деформации на микроструктуру и механические свойства алюминиевого сплава AA2B06-O системы Al-Cu-Mg / Б. Б. Хина [и др.] // Изв. вузов. Цветная металлургия. – 2021. – Т. 27, № 4. – С. 59–69. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2021-4-59-69>
2. Покровский, А. И. Развитие технологий пластического формообразования металлов с использованием промежуточных сред (гидродинамическое выдавливание, гидроударная штамповка) // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2016. – № 1. – С. 80–92.
3. Ващенко, А. П. Экспериментальные методы и механические свойства конструкционных материалов при высокоскоростной деформации ($10^2 \dots 10^5 \text{ с}^{-1}$) и температурах 77...773 К // Проблемы прочности. – 2002. – № 3. – С. 55–61.
4. Brandon, D. Microstructural characterization of materials / D. Brandon, W. D. Kaplan. – Chichester, England, 2008. – 536 p. <https://doi.org/10.1002/9780470727133>
5. Spring-back behaviors of Ti-6Al-4V sheet under the effect of strain rate / Hao Li [et al.] // International Journal of Mechanical Sciences. – 2023. – Vol. 260. – Art. 108646. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2023.108646>
6. Романовский, В. П. Справочник по холодной штамповке / В. П. Романовский. – Л., 1979. – 520 с.
7. Замоторин, М. И. Механические испытания металлов / М. И. Замоторин, Л. П. Зайцева. – Л., 1975. – 132 с.
8. Оценка штампуемости листовых титановых сплавов / А. И. Покровский [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. науч. тр.: в 2 кн. – Минск, 2022. – Кн. 1: Материаловедение / редкол.: В. Г. Залесский (гл. ред.) [и др.]. – С. 208–216.
9. Хоникомб, Р. Пластическая деформация металлов / Р. Хоникомб; пер. с англ. – М., 1972. – 408 с.
10. Meyers, M. A. A model for the effect of grain size on the yield strength of metals / M. A. Meyers, E. Ashworth // Philosophical Magazine A. – 1982. – Vol. 46, N 5. – P. 737–759. <https://doi.org/10.1080/01418618208236928>

References

1. Khina B. B., Pokrovsky A. I., Shi-Hong Zhang, Yong Xu, Da-Yong Chen, Marysheva A. A. Effect of strain rate on the microstructure and mechanical properties of aluminum alloy AA2B06-O of the Al-Cu-Mg system. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 2021, vol. 62, pp. 545–553. <https://doi.org/10.3103/s1067821221050060>
2. Pokrovsky A. I. Development of plastic metal forming technologies with use of intermediate media (impact hydroforming and hydrodynamic extrusion). *Vestsi Natsyyanal' nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2016, no. 1, pp. 80–92 (in Russian).
3. Vashchenko A. P. Experimental methods and mechanical properties of structural materials subjected to high-rate deformation 10^2 – 10^5 s^{-1} at temperatures of 77–773 K. *Strength of Materials*, 2002, vol. 34, no. 3, pp. 246–250. <https://doi.org/10.1023/a:1016258314337>
4. Brandon D., Kaplan W. D. *Microstructural characterization of materials*. Chichester, England, 2008. 536 p. <https://doi.org/10.1002/9780470727133>
5. Hao Li, Si-Rui Xie, Shi-Hong Zhang, Shuai-Feng Chen, Hong-Wu Song, Yong Xu, Pokrovsky A. I., Khina B. B. Spring-back behaviors of Ti-6Al-4V sheet under the effect of strain rate. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2023, vol. 260, art. 108646. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2023.108646>

6. Romanovskiy V. P. *Handbook on cold metal forming*. Leningrad, 1979. 520 p. (in Russian).
7. Zamotorin M. I., Zaytseva L. P. *Mechanical testing of metals*. Leningrad, 1975. 132 p. (in Russian).
8. Pokrovskii A. I., Petrakouski V. S., Khina B. B., Glushakov A. N., Shparlo D. A., Tolkachova O. A. Evaluation of formability of sheet titanium alloys. *Sovremennye metody i tekhnologii sozdaniya i obrabotki materialov: sbornik nauchnykh trudov: v 2 knigakh. Kniga 1: Materialovedenie* [Advanced methods and technologies of materials development and processing. Collection of scientific papers in 2 volumes. Volume 1: Materials Science]. Minsk, 2022, pp. 208–216 (in Russian).
9. Honeycombe R. W. K. *The plastic deformation of metals*. London, UK, 1968. 483 p.
10. Meyers M. A., Ashworth E. A model for the effect of grain size on the yield strength of metals. *Philosophical Magazine A*, 1982, vol. 46, no. 5, pp. 737–759. <https://doi.org/10.1080/01418618208236928>

Информация об авторах

Покровский Артур Игоревич – канд. техн. наук, доцент, заведующий лабораторией. Физико-технический институт НАН Беларуси (ул. Купревича, 10, 220084, Минск, Республика Беларусь). E-mail: art@phti.by.

Хина Борис Борисович – д-р физ.-мат. наук, профессор, гл. науч. сотрудник. Физико-технический институт НАН Беларуси (ул. Купревича, 10, 220084, Минск, Республика Беларусь). E-mail: khina_brs@mail.ru.

Йонг Шю – профессор, руководитель группы. Институт исследования металлов Китайской академии наук (72, Wenhua Road, Shenyang, 110016, China). E-mail: yxu@imr.ac.cn.

Ши-Хонг Жанг – профессор, научный консультант. Институт исследования металлов Китайской академии наук (72, Wenhua Road, Shenyang, 110016, China). E-mail: shzhang@imr.ac.cn.

Баоченг Янг – научный сотрудник. Институт исследования металлов Китайской академии наук (72, Wenhua Road, Shenyang, 110016, China). E-mail: bchyang19b@imr.ac.cn.

Information about the authors

Pokrovsky Artur I. – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Head of the Laboratory. Physical-technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Kuprevich Str., 220084, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: art@phti.by.

Khina Boris B. – D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Chief Researcher. Physical-technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Kuprevich Str., 220084, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: khina_brs@mail.ru.

Yong Xu – Professor, Ph. D., Head of the Group. Institute of Metal Research of the Chinese Academy of Sciences (72, Wenhua Road, Shenyang, 110016, China). E-mail: yxu@imr.ac.cn.

Shi-Hong Zhang – Professor, Ph. D., Scientific Consultant. Institute of Metal Research of the Chinese Academy of Sciences (72, Wenhua Road, Shenyang, 110016, China). E-mail: shzhang@imr.ac.cn.

Baocheng Yang – Ph. D., Researcher. Institute of Metal Research of the Chinese Academy of Sciences (72, Wenhua Road, Shenyang, 110016, China). E-mail: bchyang19b@imr.ac.cn.

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

СОЦИАЛЬНО-ГУМАНИТАРНЫЕ НАУКИ
SOCIAL SCIENCES AND HUMANITIES

УДК 821.161.3'06.09:008(476)
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2024-68-5-421-428>

Поступило в редакцию 10.09.2024
Received 10.09.2024

Л. Г. Дуктава

*Цэнтр даследаванняў беларускай культуры, мовы і літаратуры Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі,
Мінск, Рэспубліка Беларусь*

**НАЦЫЯНАЛЬНЫЯ КОДЫ Ў ЭПІЧНЫХ ТВОРАХ БЕЛАРУСКАЙ ЛІТАРАТУРЫ
МЯЖЫ ХХ–ХХІ СТСТ.**

(Прадстаўлена акадэмікам А. І. Лакоткам)

Аннотация. В рамках исследования рассмотрены особенности рецепции национальных культурных кодов в эпических произведениях белорусской литературы периода 1990–2020-х годов. Исследование проблемы национальных кодов в литературе обусловлено междисциплинарными задачами современного гуманитаризма, общественным запросом, потому что использование культурных кодов в художественном произведении позволяет при минимальной экспликации достичь определенного эффекта воздействия на реципиента, при этом их наличие проявляется в релевантности образов, мотивов художественного произведения элементам картины мира, накопленным в памяти читателя. Впервые в отечественном литературоведении предложены подходы к определению понятия «национальный культурный код», рассматриваемого как семиотическая единица, являющаяся носителем глубинного историко-культурного смысла, с помощью которого определяются социальные, экономические, геополитические, культурные особенности, специфика национального мировоззрения, модели поведения представителей определенной нации или населения страны в целом, в литературоведении рассматривается в рамках семиотического подхода. Определены и охарактеризованы различные виды кодов. На примере эпических произведений В. Гниломёдова, И. Шамякина, К. Цwirки, А. Федоренко, А. Козлова, В. Гавриловича, Я. Сипакова и других белорусских писателей рассмотрены особенности национальной мировоззренческой позиции по вопросу национальной идентичности, при показе которой художники слова обращаются к культурным кодам.

Ключевые слова: национальный код, эпос, белорусская литература, художественный образ, современная литература

Для цитирования. Дуктава, Л. Г. Нацыянальныя коды ў эпічных творах беларускай літаратуры мяжы ХХ–ХХІ стст. / Л. Г. Дуктава // Докл. Нац. акад. навук Беларусі. – 2024. – Т. 68, № 5. – С. 421–428. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2024-68-5-421-428>

Liubou G. Duktava

*Center for the Belarusian Culture, Language and Literature Researches of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Republic of Belarus*

**NATIONAL CODES IN THE EPIC WORKS OF BELARUSIAN LITERATURE AT THE TURN
OF THE XX–XXI CENTURIES**

(Communicated by Academician Alexander I. Lokotko)

Abstract. In this study, the features of reception of national cultural codes in the epic works of Belarusian literature during the period of 1990–2020s were considered. The study of the problem of national codes in beautiful writing is conditioned by the interdisciplinary tasks of modern humanitarianism, public inquiry, because the use of cultural codes in a work of art allows one, with minimal explication, to achieve a certain effect in the reader's memory. For the first time in domestic literary studies, the approaches to defining the concept of “national cultural code” are proposed, which is considered as a semi-otic unit that is a carrier of deep historical and cultural meanings, through which social, economic, geopolitical, cultural

features are revealed. In literary studies, the specificity of national worldview and the behavior of representatives of a certain nation or the population of the country as a whole are analyzed using the semiotic approach. Various types of codes have been defined and characterized: ear code, billet code, etc. Using the example of the epic works of U. Gnilamedov, I. Shamyakin, K. Tsvirka, A. Fedorenko, A. Kozlov, U. Gavrilovich, Ya. Sipakov and other Belarusian writers, the features of the national worldview identity, in which the word artists refer to cultural codes, are considered.

Keywords: cultural code, national picture of the world, epic, fiction, cultural universals, cultural meanings

For citation. Duktava L. G. National codes in the epic works of Belarusian literature at the turn of the XX–XXI centuries. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2024, vol. 68, no. 5, pp. 421–428 (in Belarusian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2024-68-5-421-428>

Уводзіны. Для суверэннай Беларусі адным з важных пытанняў з'яўляецца вызначэнне асноў нацыянальнай ідэнтычнасці як стрыжня кансалідацыі насельніцтва дзяржавы, таму вывучэнне культурных кодаў у мастацкай прасторы звязана з вызначэннем спецыфікі сэнсавых узроўняў ментальнага поля, вылучэннем сімвалаў, нацыянальных вобразаў, якія найбольш трапна характарызуюць асаблівасці светапогляду, мадэлі паводзін, духоўна-эстэтычныя каштоўнасці беларускага грамадства. Існуе шэраг метадаў вывучэння асноўных складнікаў сістэмы нацыянальных культурных кодаў: арганізацыя анкетавання, праца з фокус-групамі, правядзенне кантэнт-аналізу матэрыялаў сродкаў мас-медыя, а таксама аналіз твораў, звязаных з мастацкай свядомасцю насельніцтва (літаратуры, выяўленчага мастацтва, кінематографа, вуснай паэтычнай творчасці і інш.). На сучасным этапе ў айчынным і замежным літаратуразнаўстве дасягнуты пэўныя поспехі ў даследаванні культурных кодаў, пэўныя вынікі па гэтым пытанні выкладзены ў дысертацыйных даследаваннях «Нацыянальныя культурныя коды ў раманах Дэна Сіманса» Я. Кулікова, «Культурныя коды ў лірыцы А. Шварц» А. Раманава, «Паэзія У. Высоцкага і заходнееўрапейская літаратура Сярэднявечча і Адраджэння: узаемадзеянне культурных дыскурсаў і культурных кодаў» Л. Калугінай, «Марбуальны код рускай літаратуры XX–XXI стст.» А. Трубяцкавай, «Тыпалогія культурных кодаў у драматургіі Л. М. Андрэева» Т. Болдыравай, «Метасюжэт лёсу лірычнага героя ў паэзіі С. А. Ясеніна: асноўныя культурна-мастацкія коды і матыўныя комплексы» М. Жылінай, «Канцэптуалізацыя нацыянальнага ў беларускай прозе першай трэці XX стагоддзя» А. Мельнікавай і інш. Правядзенне навуковага даследавання па рэпрэзентацыі культурных кодаў у творах прыгожага пісьменства мэтазгодна скіраваць на вызначэнне сістэмы нацыянальных вобразаў, якія трапна характарызуюць жыццёвы ўклад, гаспадарчую сістэму, традыцыі, асаблівасці нацыянальнага характару і інш.

Матэрыялы і метады даследавання. Комплексны падыход да вывучэння заяўленай праблемы абумовіў метадалогію даследавання, асновай якой з'яўляюцца семіятычны, рэцэптыўны і параўнальна-тыпалагічны метады з дыскурсным, кантэкстуальным і цэласным аналізам мастацкага тэксту. Аб'ектам даследавання з'яўляюцца эпічныя творы беларускай літаратуры перыяду 1990–2020-х гадоў У. Гніламедава, У. Гаўрыловіча, А. Федарэнкі, А. Казлова, К. Цвіркі, І. Шамякіна і інш.

Вынікі і іх абмеркаванне. Пад культурным кодам мэтазгодна разглядаць, па-першае, сістэму знакаў, сімвалаў, характэрную для пэўнай культуры, скіраваную на яе ідэнтыфікацыю і выкарыстанне носьбітамі гэтай культуры; па-другое, правілы і спосабы рэпрэзентацыі глыбінных сэнсаў, захаваных у культурным асяродку пэўнай групы соцыуму; па-трэцяе, сукупнасць уяўленняў, ведаў, якія характарызуюць этнічныя асаблівасці, каштоўнасныя арыенціры, ментальныя ўстаноўкі грамадства. З улікам таго, што культурныя коды выступаюць культурастваральнымі элементамі нацыянальнай культурнай прасторы, прапанавана азначэнне паняцця нацыянальнага культурнага кода як семіятычнай адзінкі, якая з'яўляецца носьбітам культурных сэнсаў, што датычацца пэўных культурных універсальных (роднасных сувязі, касмалогія, стаўленне да ўлады, каляндар і інш.), якія рэпрэзентаваны ў прыгожым пісьменстве з дапамогай мастацкіх вобразаў і матываў і дазваляюць вызначыць асаблівасці нацыянальнай светапогляднай пазіцыі, бо адлюстраваныя ў творах літаратуры сэнсы, каштоўнасці, ідэалы, мадэлі паводзін з'яўляюцца важнымі для пэўнай нацыянальнай супольнасці.

У Рэспубліцы Беларусь навуковае даследаванне культурных кодаў праводзіцца ў наступных галінах: у мовазнаўстве, літаратуразнаўстве, этналогіі і фалькларыстыцы, культуралогіі, сацыя-

логіі, філасофіі і эканоміцы. Істотныя вынікі па вызначэнні ролі культурных кодаў у вербальнай камунікацыі зроблены айчыннымі мовазнаўцамі, пра што сведчыць шэраг работ па лінгвакультуралогіі. Сістэма кодаў разгледжана В. Маславай у рабоце «Коды лінгвакультуры» (2016), падрыхтаванай у суаўтарстве з расійскай даследчыцай М. Піменавай. Класіфікацыя культурных кодаў прапанавана В. Ляшчынскай у рабоце «Ідыяматыка беларускай мовы ў лінгвакультуралагічным асвятленні» (2019), асобна гастронамічны код разгледжаны ў манаграфіях «Гастронамічны код культуры беларусаў. Стэрэатыпы ежы ў вобразах фразеалагізмаў беларускай мовы» (2022), «Гастронамічны код культуры беларусаў. Стэрэатыпы напіткаў і іх ужывання ў вобразах фразеалагізмаў беларускай мовы» (2023).

У этналогіі і фалькларыстыцы ґрунтоўным комплексным даследаваннем дэнтралагічнага і арніталагічнага кодаў беларускага традыцыйнага фальклору на аснове інтэрдысцыплінарнага падыходу з’яўляюцца манаграфіі І. Швед «Дэнтралагічны код беларускага традыцыйнага фальклору» (2004), «Арніталагічны код беларускай традыцыйнай духоўнай культуры» (2019). Работа па сістэматызацыі вялікага пласта матэрыялаў і фарміраванні класіфікацыйнай мадэлі канцэптuallyных кодаў міфапаэтычнага мыслення беларусаў праводзілася даследчыцай па заданні «Структурна-тыпалагічныя параметры кодаў міфапаэтычнай карціны свету беларусаў (па фальклорных запісах ХІХ – пачатку ХХІ ст.)», якое выконвалася ў межах Дзяржаўнай праграмы навуковых даследаванняў «Гісторыя, культура, грамадства» на 2011–2015 гг. («Народная творчасць у сацыякультурных умовах сучаснай Беларусі: рэгіянальнае шматаблічча і міжславянскія сувязі фальклору і постфальклору»). Сістэма кодаў паводле традыцыйнай культуры беларусаў прапанавана С. Санько ў прадмове да энцыклапедычнага выдання «Беларуская міфалогія». Вызначэнню культурных кодаў у беларускай пазаабрадавай паэзіі прысвечана серыя навуковых артыкулаў Я. Грыневіч: «Антрапалагічны код беларускіх пазаабрадавых лірычных песень», «Арніталагічны код беларускіх пазаабрадавых лірычных песень», «Каляндарна-храналагічны код беларускіх пазаабрадавых лірычных песень», «Лічбавы код беларускіх пазаабрадавых лірычных песень», «Саматычны код беларускіх пазаабрадавых лірычных песень» і інш.

Асноўныя вынікі даследавання тэарэтыка-метадалагічных асноў сацыялагічнага вывучэння культурнага кода як рэгулятара паўсядзённых практык беларусаў, якое праводзілася на базе Інстытута сацыялогіі Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі, выкладзены ў калектыўнай манаграфіі «Беларускае грамадства ў кантэксце цывілізацыйна-культурнага кода: сацыялагічнае вымярэнне» (2017). У навуковай рабоце разгледжана канцэптuallyная мадэль даследавання культурнага кода сучаснага грамадства, у якой вызначаны параметры сацыякультурнага поля, дзе адбываюцца працэсы кадзіравання і раскадзіравання. Падкрэсліваецца актуальнасць вывучэння культурных кодаў для вызначэння сацыякультурнага патэнцыялу, які з’яўляецца падмуркам для прагназавання варыянтаў пажаданай будучыні і пабудовы ўласнай гістарычнай траекторыі дзяржавы: «Веданне культурна-цывілізацыйнага кода свайго народа можа даць дастаткова абґрунтаваны адказ на пытанне: “Куды мы ідзём? Ці ёсць у нашай ментальнасці такія рысы, якія дазваляць нашай краіне дасягнуць эканамічнага і сацыяльнага дабрабыту абапіраючыся на ўласную эканамічную і сацыяльна-палітычную мадэль, ці трэба нам адмовіцца ад некаторых рыс ментальнасці, каб ісці па накатаным шляху развітых краін?”» [1, с. 12]. Асаблівасці культурнага кода з боку філасофіі разгледжаны беларускімі даследчыцамі Я. Бабосавым, Я. Кузняцовай і інш. У 2019–2020 гг. Інстытутам філасофіі НАН Беларусі быў рэалізаваны праект фундаментальных і прыкладных даследаванняў «Беларуская этнафіласофія ў сістэме нацыянальнай культуры». У выданні «Трошкі бліжэй да Сонца, трошкі далей ад Месяца: беларуская народная філасофія» (2023) адлюстраваны ключавыя тэмы, ідэі, канцэпты, занатаваныя ў духоўнай культуры беларусаў, падкрэсліваецца, што аб’ёмнасць зместу культурнага кода выклікана яго ўніверсальнасцю і магчымасцю працяжыцца там, дзе гутарка ідзе пра этнакультурную спецыфіку светаўспрымання і светабачання народа.

Культурныя коды мэтазгодна ўлічваюць у эканоміцы паводзін, на што звярнуў увагу беларускі эканаміст К. Руды ў манаграфіі «Таму што мы так вырашылі: паводзінская эканоміка Беларусі і яе раскадзіраванне» (2017), дэкан эканамічнага факультэта МДУ імя М. В. Ламаносава А. Аўзан у кнізе «Культурныя коды ў эканоміцы: як каштоўнасці ўплываюць на канкурэнцыю, дэмакра-

тыю і дабрабыт народа» (2022). На макраэканамічным узроўні культурныя коды дазваляюць трапна пабудоваць камунікацыю паміж рэгіёнамі, дзяржавамі. У міжнароднай практыцы ў дзяржаўных стратэгічных дакументах тэрмін «культурны код» выкарыстаны ў «Стратэгіі дзяржаўнай нацыянальнай палітыкі Расійскай Федэрацыі на перыяд да 2025 года», а таксама ў нацыянальнай стратэгіі «Казахстан-2050».

Вывучэнне культурных кодаў праз вызначэнне сістэмы нацыянальных вобразаў у прыгожым пісьменстве можа стаць падмуркам для фарміравання нацыянальнай ідэі. Асноўная функцыя нацыянальнай ідэі – кансалідацыя грамадства. І. Катляроў разглядае нацыянальную ідэю як духоўна-маральную і інтэлектуальную каштоўнасць, «якая дэтэрмінуе развіццё нацыі і падштурхоўвае яе грамадзян да творчасці і развіцця, аб'яднання, згуртавання і мабілізацыі для сумеснага вырашэння найважнейшых задач і праблем гістарычнага развіцця» [1, с. 41]. Культурны код разглядаецца ва ўзаемасувязі з такімі паняццямі, як «культурная матрыца», «ментальнасць», «падсвядомае», «сэнс» і інш. У пасланні Прэзідэнта Рэспублікі Беларусь А. Лукашэнкі да беларускага народа і Нацыянальнага сходу ў 2023 г. адзначана, што на вызначэнне культурнага кода і менталітэту беларусаў меў уплыў канфесійны выбар, занатаваны на хрысціянскай пазіцыі светасузірання. Гэта адзін з важных аспектаў, які падкрэслівае спецыфіку нацыянальнай ідэнтычнасці.

Даследаванне нацыянальных кодаў у беларускай літаратуры мяжы ХХ–ХХІ стст. праводзіцца Інстытутам літаратуразнаўства Цэнтра даследаванняў беларускай культуры, мовы і літаратуры НАН Беларусі ў рамках выканання навукова-даследчай работы «Беларуская літаратура ХХ–ХХІ стст. у сістэме нацыянальнай культуры: разнастайнасць мастацкіх пошукаў і перспектывы развіцця ва ўмовах інфармацыйнага грамадства» задання 6.2.10 «Мастацкая літаратура беларускага народа перыяду Новага часу» падпраграмы «Беларуская мова і літаратура» дзяржаўнай праграмы навуковых даследаванняў на 2021–2025 гады «Грамадства і гуманітарная бяспека беларускай дзяржавы». Мэтай даследавання з'яўляецца выяўленне асаблівасцей светапогляднай нацыянальнай, ментальнай пазіцыі, занатаванай у мастацкіх тэкстах беларускага эпасу перыяду незалежнай Беларусі на шэрагу нацыянальных культурных кодаў, сярод задач – вылучыць нацыянальныя коды, якія выкарыстоўваюцца ў творах сучасных беларускіх празаікаў. На падставе аналізу асноўных падыходаў, прапанаваных даследчыкамі ў галіне лінгвакультуралогіі, этналогіі і фалькларыстыкі, а таксама з улікам літаратуразнаўчых прац рускіх, беларускіх, замежных навукоўцаў па даследаванні выкарыстання культурных кодаў у прыгожым пісьменстве, прапанавана сістэма культурных кодаў, якая складаецца з чатырох модуляў.

Па-першае, модуль «Жыццядзейнасць чалавека» (саматычны, марбуальны, духоўны коды). Код, які звязаны з семіятызацыяй цела чалавека і яго частак, вылучаны ў класіфікацыях В. Красных, М. Каўшовай, В. Маславай, М. Піменавай, В. Ляшчынскай як саматычны, у сістэмах кодаў В. Целіі, Н. Сцяпанавай прадстаўлены як цялесны код, фізіёлага-саматычны – ў сістэме кодаў Т. Лявонцэвай. Разгляду асаблівасцей канцэптуалізацыі цела ў традыцыйнай культуры беларусаў прысвечана манаграфія «Цела чалавека: слова, міф, рытуал» Т. Валодзінай, выданне «Цялесны код рускай культуры: матэрыялы да слоўніка» М. Каўшовай, М. Гудкова і інш. У беларускай літаратуры новага часу пачалі з'яўляцца творы, у якіх пісьменнікі даволі адкрыта і натуралістычна закранаюць пытанні цялеснасці, паказваючы ўзаемаадносіны мужчыны і жанчыны. Такія сцэны прысутнічаюць у эпічных творах «Зубрэвіцкая сага» Я. Сіпакова, «Юргон» А. Казлова, «Жар каханя» Г. Далідовіча і інш. Цялеснасць у творах сучасных аўтараў не заўсёды ўспрымаецца апазіцыяй духоўнасці, падчас саматыка ўсведамляецца як спосаб пазнання духа. Духоўны код грунтуецца на ацэнках, якія чалавек дае сабе і свету. Дыялектыка добра і зла ў творах прыгожага пісьменства звязана з адлюстраваннем духоўнага жыцця чалавека, маральна-этычных каштоўнасцей і нормаў паводзін грамадства.

З марбуальным кодам звязана рэцэпцыя хваробы, лекара, нават медыцынскай установы ў мастацкай літаратуры. У дысертацыйнай рабоце «Марбуальны код рускай літаратуры ХХ–ХХІ стст.» даследчыца А. Трубяцкова звяртаецца да прачытання кода хваробы як бяды, няшчасця, кода лекара – як выратавання, пазбаўлення болю, кода бальніцы-турмы – як ахвярнасці. У беларускай літаратуры новага перыяду да апісання хваробы як бяды і выпрабавання звяртаюцца

Л. Рублеўская (апаবাদанне «Жалезная кнопка»), А. Казлоў (раман «Юргон») і інш. У аповесці «Нелюдзімы» А. Бадака код лекарства (знахарства) – выратаванне праз вяртанне да гаючых духоўных вытокаў беларусаў і іх захаванне.

Па-другое, у склад модуля «Чалавек і прырода» мэтагодна ўключыць жывёльны, раслінны і метэаралагічны коды. Раслінны (вегетатыўны, фітаморфны, батанічны) код прысутнічае ў класіфікацыях Н. Сцяпанавай, С. Санько, В. Целіі, В. Ляшчынскай, М. Каўшовай, М. Гудкова, В. Маславай, М. Піменавай і інш. Раслінны код мае два субкоды: фітанімічны (назвы кветак, травы) і дэндранімічны (дэндралагічны). Мэтазгодна выдзеліць нацыянальны вобраз валошкі, які з’яўляецца адным з вядомых сімвалаў Беларусі, беларусаў. Выкарыстанне выявы валошкі ў айдэнтыфікацыі сучасных айчынных брэндаў мае на мэце падкрэсліць беларускае паходжанне (брэнды дзяржаўнай авіякампаніі «Белавія», прысутнасць кветкі на лагатыпе міжнароднага фестывалю мастацтваў «Славянскі базар у Віцебску»). Выклікаюць сімпатыю і замілаванасць гэтыя сінія кветкі, якія растуць у жыце на мяжы. Гэты метафарычны вобраз адлюстраваны ў рамане «Валошкі на мяжы» У. Гніламедава, у якім паказана жыццё Заходняй Беларусі ў міжваеннае дваццацігоддзе. На мяжы важных сацыяльна-палітычных змен, у своеасаблівым эпіцэнтры ваеннай канфрантацыі, эканамічнай трансфармацыі паказана гісторыя беларускай сям’і, вёскі Прускі. Вобраз валошкі ў творы У. Гніламедава сімвалізуе жыццясцвярдзальную сутнасць беларусаў.

Культурны код, які звязаны з адлюстраваннем свету жывёл, у розных класіфікацыях культурных кодаў мае наступныя назвы: жывёльны (С. Санько), фаўністычны (Г. Мезенка), заалагічны (Т. Лявонцьева), заморфны (В. Маслава, М. Піменава, В. Целія, Н. Сцяпанова). У якасці прыкладу нацыянальнага кода, характэрнага для беларускай мастацкай свядомасці, разгледзім код бусла. Назва вядомага нарыса У. Караткевіча «Зямля пад белымі крыламі» сведчыць пра выкарыстанне арніталагічнага кода ў размове пра Беларусь. Вобраз бусла ў шэрагу твораў беларускай літаратуры сімвалізуе радзіму, чысціню («Бусел» А. Кажадуба, «Выратуй і памілуй нас, чорны бусел» В. Казько і інш.).

Па-трэцяе, модуль «Чалавек і грамадства» прадстаўлены персанажным кодам, з якім звязана фарміраванне пантэона герояў. Адным з аспектаў у гэтым кірунку з’яўляецца цікавасць беларускіх мастакоў слова да гістарычнай тэмы, калі закраналіся пытанні гістарычнага шляху беларускай дзяржаўнасці (напрыклад, у творы «Рыцары Бelay Русі» І. Саверчанкі паказаны рэальныя асобы, з якімі звязаны славы старонкі беларускай гісторыі – першы полацкі князь Рагвалод і яго дачка Рагнеда, магутны кіраўнік Усяслаў Чарадзеі, вялікія князі Міндоўг, Войшалк і Трайдзень), характарыстыкі маральна-этычных каштоўнасцей і спецыфікі нацыянальнага характару (напрыклад, у рамане «Меч князя Вячкі» Л. Дайнэкі вобраз князя Вячкі – добрага бацькі, мужа, смелага, сумленнага чалавека).

Адной з важных тэм беларускай літаратуры з’яўляецца тэма Вялікай Айчыннай вайны. У творах беларускіх пісьменнікаў І. Шамякіна, І. Чыгрынава, У. Гніламедава, І. Навуменкі паказана Беларусь партызанская. Шырока вядомым стала словазлучэнне «партызан Беларусі», з якім звязаныя ментальныя ўстаноўкі беларусаў, талерантных і прыязных у мірных умовах жыцця, аднак здольных у крытычнай сітуацыі пагрозы суверэнітэту, гвалту для блізкіх людзей мабілізавацца і даць адпор. На дадзены факт звяртае ўвагу літаратуразнаўца І. Шаладонаў, які разглядаючы экзістэнцыйны вобраз беларускага партызана ў аповесцях, зазначае, што калі ў статусе мірнага жыхара пазіцыя беларуса грунтуецца на лаяльнасці і падпарадкаванасці пэўнаму суверэну (каралю, дзяржаве), то ў выпадку акупацыі «менавіта партызан свядома бярэ на сябе частку правоў былога суверэна, гэтым самым надзяляючы сябе эксклюзіўным правам несці адказнасць за лёс сваёй зямлі, за абарону сваіх правоў, а таксама сваякоў і аднапляменцаў» [2, с. 66]. Даследчык удакладняе, будучы да канца не пазначаным у статусе «правы вайны» беларус у нечым становіцца міжвольным дэтанатарам жорсткага супрацьстаяння адносна падаўлення народа з боку акупацыйных сіл: «Працэс вядзення вайны, яго формы і спосабы супрацьстаяння паміж варагуючымі бакамі атрымліваюць амаль бязмежны і татальны характар, спараджаючы вялікую лютасць і ахвярнасць сярод мірных жыхароў» [2, с. 66].

Па-чацвёртае, модуль «чалавек і свет» складаюць наступныя коды: прасторавы, часавы, лікавы, колеравы, астранамічны, атрыбутыўны, прадметны, акцыянальны, гастронамічны.

Прасторавы і часавы коды звязаны з семіятызацыяй месца і часу, у класіфікацыях даследчыкаў маюць назвы «ландшафтавы», «фізіка-геаграфічны», «ландшафтва-тапаграфічны» ў адносінах да прасторавага коду, а таксама каляндарна-храналагічны, тэмпаральны – у дачыненні да часовага коду. У сусветнай літаратуры прасторавы і часавы коды выкарыстоўваюцца пры адлюстраванні уяўленняў аб свяшчэннай тэрыторыі і «залатым стагоддзі» пэўнай дзяржавы. Узаемадзеянне прасторавага і часовага кодаў прасочваецца ў мастацкай літаратуры на каштоўнасна-сімвалічным узроўні, калі гаворка ідзе пра гістарычны шлях дзяржавы, ідэалы і каштоўнасці. Каб падкрэсліць нацыянальныя прасторава-часавыя асаблівасці ў літаратурным творы аўтарамі выкарыстоўваюцца вобразы вялікіх кіраўнікоў, герояў, як адначалася вышэй, а таксама вобразы знакавых месцаў. Пра ролю вызначэння асаблівасцей прасторы і часу пры разглядзе пытання нацыянальнай ідэнтычнасці адзначае нямецкі даследчык К. Хюбнер: «Нацыя вызначаецца паводле сваёй гісторыі і прасторы, у якой гэтая гісторыя адлюстроўвалася» [3, с. 325].

Да ліку нацыянальных кодаў мэтазгодна аднесці код партызанскага лесу, які прэзентаваны ў беларускай літаратуры другой паловы XX – пачатку XXI стагоддзя, звязаны не толькі з ваенным перыядам, але і ў цэлым з успрыманнем беларусамі лесу як надзейнага сховішча ў складанай сітуацыі, месца адчування волі (свабода ёсць заўсёды). На працягу гісторыі партызанскі лес не раз з'яўляўся месцам, якое бараніла ад пагроз, месцам, дзе выяўляюцца канстанты нацыянальнага характару: ахвяраваць сабой, але захаваць годнасць; не спадзявацца ні на каго і старанна працаваць, каб дабіцца поспеху; нягледзячы на перашкоды верыць у лепшую будучыню.

Лікавы код тычыцца лічбаў, колькасных характарыстык. У эпічных творах сучасных беларускіх аўтараў асноўнымі чыннікамі гэтага кода з'яўляюцца лічбы, звязаныя як з хрысціянскай сімволікай («адзін», «тры», «дванаццаць», «сорак» і інш.), так і з адлюстраваннем мноства (мільярд, мільён): «Адна капейка» У. Сцяпана, «Адзінка» Л. Рублеўскай, «Мільярд удараў» Ю. Станкевіча і інш.

Колеравы код звязаны з семіятызацыяй складнікаў каляровай палітры. З дапамогай дадзенага кода ў творах літаратуры знаходзяць адлюстраванне каларыстычныя асаблівасці нацыянальнай палітры (пейзаж, адзенне і інш.), асаблівы акцэнт можа быць зроблены на каляровай сімволіцы. Даследаванню наймення колераў прысвечаны работы спецыялістаў у галіне культуралогіі, лінгвістыкі, тэксталогіі, этналогіі і фалькларыстыкі (М. Абрагімовіч, Ю. Бабіч, А. Брагіна, А. Васілевіч, Т. Валодзіна, Я. Волкава, В. Ермакова, Т. Макеенка, В. Ляшчынская, І. Швед, Ю. Яроцкая і інш.). І. Швед адзначае, што колеравы код выступае адным з найпрадуктыўнейшых мастацкіх рэсурсаў, праз яго перадаецца цэлы комплекс этнафізіялагічных, этнамедыцынскіх, этнаэстэтычных і іншых уяўленняў. Белы, чорны, чырвоны колеры складаюць асноўны спектр каляровай сімволікі ў міфапаэтычнай карціне свету беларусаў. Даследчыкі разглядаюць таксама сіні (блакітны), зялёны, шэры, жоўты (залаты) колеры, звязаныя з беларускім каларытам. Трыяда «белы–чорны–чырвоны» звязана з жыццёвым цыклам чалавека, яго нараджэннем, смерцю, жыццём, што знаходзіць адлюстраванне ў этнаграфічных аб'ектах (чырвоны кут у доме, белае святочнае адзенне, чорны саван і інш.), у творах вуснай паэтычнай творчасці. Белы колер сімвалізуе чысціню, святасць, што падкрэсліваецца і пры трактоўцы назвы краіны Беларусь (як вытворнае ад намінацыі «Белая Русь»), што адлюстравана ў назве твора на гістарычную тэматыку «Рыцары Бelay Русі» І. Саверчанкі. Метафара «зямля пад белымі крыламі» трывала замацавалася за Беларуссю з выхадам у свет аднайменнага нарыса У. Караткевіча, дзе акрамя колеру акцэнт зроблены і на бусла. Чырвоны колер як код жыцця прысутнічае ў сістэме мастацка-вобразных сродкаў у рамане «Воўчая выспа» К. Цвіркі, у апавяданні «Рабіна» А. Федарэнкі і інш. Па прынцыпе бінарнай апазіцыі гэтым двум колерам супрацьпастаўляецца чорны колер, які сімвалізуе цёмны пачатак (смерць, хвароба, зло і інш.). Чорны колер як код смерці шырока выкарыстоўваецца ў творах на чарнобыльскую тэму, асабліва ў лірыцы, ліра-эпасе (напрыклад, «Чорны боль» В. Вабішчэвіч). Аднак у апавесці «Выратуй і памілуй нас, чорны бусел» В. Казько з вобразам чорнага бусла звязана надзея аб працягу жыцця і выратаванні ад бяды.

Выкарыстанне прадметнага кода ў літаратуры звязана з семіятызацыяй рэчаў. Нацыянальны код кужалы выступае ключом да разумення ідэйнай скіраванасці раманняга цыклу У. Гніламедава. З дапамогай кода кужалы паказана каштоўнасць сям'і, роду, роднай зямлі, каштоўнасць выба-

ру ў поліфаніі меркаванняў, пошуку існасці. Ільняное палатно сімвалізуе чалавечыя лёсы, якія яднаюцца ў агульную гісторыю народа, пад покрывам рода, роднай зямлі чалавек адчувае сябе найбольш утульна, бяспечна і шчасліва.

Акцыянальны код звязаны з семіятызацыяй дзеянняў. Мэтазгодна выдзеліць нацыянальны код талакі (калектыўнай працы), які падкрэслівае асаблівасці нацыянальнага характару: добра-зчылівасць, сяброўства, працавітасць. Для беларускай ментальнасці характэрным з'яўляецца падпарадкаванне толькі на разумных падставах, пры гэтым саюзы выступаюць адной з каштоўнасцей. І гаворка ідзе не толькі пра аб'яднаўчыя магчымасці сямейнасці, гістарычныя карані якой мы назіраем у эвалюцыі беларускай вёскі, што першапачаткова існавала як кангламерат, дзе суседнічаюць прадстаўнікі розных родаў. Талаку складаюць, як правіла, блізкія людзі – радня, сваякі, суседзі, аднавяскоўцы. Яна звязана з цяжкай працай (загатоўка сена, будаўніцтва хаты, дажынкі, дакопкі, дасеўкі і інш.), мае некалькі этапаў: запрашэнне, сумесная праца, талочнае застолле. Талака як форма ўзаемадапамогі (на невялікі прамежак часу людзі аб'ядноўваюцца, каб вырашыць пэўную задачу) выступае адным з важных саюзаў. І праяўляецца гэта не толькі падчас сельскагаспадарчых работ, як паказана ў прозе У. Гніламёдава, В. Казько, А. Жука, К. Цвіркі і інш. У апавесці І. Шамякіна «Палеская мадонна» аб'яднанне людзей розных сацыяльных статусаў дапамагае гераіні Надзеі Русак знайсці сына, у рамане «Па веры вашай» У. Гаўрыловіча творчая інтэлігенцыя прыходзіць на дапамогу галоўнаму герою пісьменніку Яўгену Кавеньку, каб абяліць памяць аб ваенным мінулым яго сям'і. Няма жадання адасобіцца, наадварот, быць разам важна для беларускай ментальнасці.

Заклучэнне. Нацыянальныя культурныя коды дазваляюць вызначыць асаблівасці ідэйнай скіраванасці твора, паказаць спецыфіку нацыянальнай светапогляднай пазіцыі, бо адлюстраваныя ў творах літаратуры сэнсы, каштоўнасці, ідэалы, мадэлі паводзін з'яўляюцца важнымі для пэўнай грамадзянскай супольнасці. Праведзены параўнальна-тыпалагічны аналіз культурных кодаў, прадстаўленых у класіфікацыях, распрацавана ўласная сістэма культурных кодаў, якая складаецца з чатырох модуляў; жыццядзейнасць чалавека (саматычны, марбуальны, духоўны коды), чалавек і прырода (аніمالістычны, раслінны і метэаралагічны коды), чалавек і грамадства (персанажны код), чалавек і свет (касмаграфічны, прасторавы, часавы, лікавы, колеравы, астранамічны, атрыбутыўны, прадметны акцыянальны (код дзеянняў), гастронамічны коды).

Выяўленне культурных кодаў пры інтэрпрэтацыі літаратурных твораў – адзін са спосабаў як да раскрыцця іх ідэйнай накіраванасці ў цэлым, так і пры данясенні пэўных культурных сэнсаў, якія праяўляюцца ў мастацкім палатне твора на імпліцытным узроўні з дапамогай характэрных вобразаў, матываў. Культурны код звязаны з архетыпічным падмуркам сістэмы нацыянальных вобразаў. Сярод нацыянальных вобразаў, якія сустракаюцца ў сучаснай беларускай прозе, што падкрэсліваюць нацыянальную маркіраванасць, – «партызанскі лес», «кужаль», «валашка», «беларускі партызан» і інш. З дапамогай вобраза кужаля паказана каштоўнасць сям'і, роду, роднай зямлі ў гепталогіі У. Гніламёдава. Код партызанскага лесу ў беларускай літаратуры звязаны не толькі з падзеямі перыяду Вялікай Айчыннай вайны, але і з успрыманням лесу як месца адчування свабоды, сховішчам для людзей, якія ў сітуацыі страты прынятага суверэна могуць правяціць ваяўнічасць, часам у спалучэнні з самаахвярнасцю. Колеравы код мае дачыненне да трыяды «белы-чорны-чырвоны», якая звязана з семіятызацыяй жыццёвага шляху чалавека ад нараджэння да смерці. На прыкладзе эпічных твораў У. Гніламёдава, І. Шамякіна, К. Цвіркі, А. Федарэнкі, А. Казлова, У. Гаўрыловіча, Я. Сіпакова і іншых беларускіх пісьменнікаў разгледжаны асаблівасці нацыянальнай светапогляднай пазіцыі ў дачыненні да пытання нацыянальнай ідэнтычнасці, пры паказе якой мастакі слова звяртаюцца да культурных кодаў.

Падзяка. Работа выканана ў межах дзяржаўнай праграмы навуковых даследаванняў на 2021–2025 гады «Грамадства і гуманітарная бяспека беларускай дзяржавы» (заданне 6.2.10).

Acknowledgments. The investigation was performed within the state program of scientific research for 2021–2025 «Society and humanitarian security of the Belarusian state» (assignment 6.2.10).

Спіс выкарыстаных крыніц

1. Беларуское грамадства ў кантэксце цывілізацыйна-культурнага кода: сацыялагічнае вымярэнне / І. В. Котляров [і др.]; рэдкал.: І. В. Котляров (гл. рэд.) [і др.]. – Мінск, 2017. – 392 с.
2. Шаладонаў, І. М. Экззістанцыйны вобраз партызана ў апавесцях беларускіх пісьменнікаў XX стагоддзя / І. М. Шаладонаў // Нацыянальная філосафія ў глабальным свеце: зб. матэрыялаў Першага беларус. філосафскага кангрэса, Мінск, 18–20 окт. 2017 г.: у 2 т. – Мінск, 2017. – Т. 1 – С. 66.
3. Хюбнер, К. Істына міфа / К. Хюбнер. – М., 1996. – 447 с.

References

1. Kotlyarov I. V. [et al.]. *Belarusian society in the context of the civilizational and cultural code: sociological dimension*. Minsk, 2017. 392 p. (in Russian).
2. Shaladonau I. M. The existential image of a partisan in the stories of Belarusian writers of the 20th century. *Natsional'naya filofosfiya v global'nom mire: sbornik materialov Pervogo beloruskogo filofosfskogo kongressa, Minsk, 18–20 oktyabrya 2017 g. T. 1* [National philosophy in the global world. Collection of materials of the First Belarusian Philosophical Congress, 18–20 October 2017. Vol. 1]. Minsk, 2017, pp. 66. (in Belarussian).
3. Hübner K. *The truth of the myth*. Moscow, 1996. 447 p. (in Russian).

Інфармацыя аб аўтары

Дуктова Любовь Георгиевна – канд. філалог. навук, доцент, ст. науч. супрацоўнік. Цэнтр ісследований беларускай культуры, мовы і літаратуры НАН Беларусі (ул. Сурганова, 1/2, 220072, Мінск, Рэспубліка Беларусь. E-mail: duktova.liubou7@gmail.com. ORCID: 0009-0003-5401-7932.

Information about the author

Duktava Liubou G. – Ph. D. (Philology), Associate Professor, Senior Researcher. Center for the Belarusian Culture, Language and Literature researches of the National Academy of Sciences of Belarus (1/2, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: duktova.liubou7@gmail.com. ORCID: 0009-0003-5401-7932.

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

АГРАРНЫЕ НАУКИ
AGRARIAN SCIENCES

УДК 614.9:637.11
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2024-68-5-429-440>

Поступило в редакцию 14.08.2024
Received 14.08.2024

**Член-корреспондент В. Н. Тимошенко, М. В. Барановский, О. А. Кажеко,
А. И. Портной, А. А. Музыка**

*Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по животноводству,
Жодино, Республика Беларусь*

**УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЕ ПРИЕМЫ САНИТАРНОЙ ОБРАБОТКИ
ТРАНСПОРТНЫХ МОЛОКОПРОВОДЯЩИХ ПУТЕЙ**

Аннотация. Работа выполнена с целью усовершенствования технологического процесса обработки внутренних поверхностей молочных шлангов для перекачки молока из доильного зала в танк-охладитель и из танка-охладителя в молоковоз. Проведенные исследования позволили установить, что молочные шланги по перекачке молока в танк-охладитель, изготовленные из различных видов материалов, в разной степени загрязнены микроорганизмами. Выявлено, что по мере увеличения сроков их эксплуатации наблюдается увеличение содержания микробных клеток на контактируемой с молоком поверхности. При этом уровень загрязнения транспортного шланга, подвергнувшегося механической чистке трансформирующейся системой на протяжении всего периода исследований, был в 1,8 раза ниже, чем шланга, обрабатываемого традиционным способом. Усовершенствованный технологический процесс обработки контактирующих с молоком транспортных путей обеспечивает высокий санитарно-гигиенический уровень молокопроводящей системы.

Ключевые слова: транспортные молочные шланги, внутренняя поверхность, загрязнение микроорганизмами, загрязненность, механическая чистка, санитарно-гигиеническое состояние, качество молока

Для цитирования. Усовершенствованные приемы санитарной обработки транспортных молокопроводящих путей / В. Н. Тимошенко [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2024. – Т. 68, № 5. – С. 429–440. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2024-68-5-429-440>

**Corresponding Member Uladzimir N. Tsimoshanka, Michael V. Baranovsky, Olga A. Kazheko,
Aliaksandr I. Partny, Andrei A. Muzyka**

*Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Animal Breeding,
Zhodino, Republic of Belarus*

IMPROVED METHODS OF SANITARY TREATMENT OF MILK DELIVERY LINES

Abstract. The article contains the results of research work aimed at improving the technological process of treatment of internal surfaces of milk hoses for pumping milk from a milking parlor to a cooling tank and from a cooling tank to a milk truck. The research has shown that milk hoses for pumping milk to the cooling tank made of different-type materials are contaminated by microorganisms to varying degrees. It has been established that as their service life increases, the content of microbial cells on the surface in contact with milk increases. At the same time, the level of contamination of the delivery hose subjected to mechanical cleaning by a transformable system during the whole research period was 1.8 times lower than that of the hose treated by the traditional method. The improved technological process of treatment of delivery lines in contact with milk ensures a high sanitary and hygienic level of the milk delivery system.

Keywords: milk delivery hoses, internal surface, contamination by microorganisms, mechanical cleaning, sanitary and hygienic condition, milk quality

For citation. Tsimoshanka U. N., Baranovsky M. V., Kazheko O. A., Partny A. I., Muzyka A. A. Improved methods of sanitary treatment of milk delivery lines. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2024, vol. 68, no. 5, pp. 429–440. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2024-68-5-429-440>

Введение. Наряду с разработкой технологических приемов наращивания объемов производства молока особую актуальность для Беларуси приобретает вопрос повышения его биологической и пищевой ценности. Спрос на молочную продукцию высокого качества обуславливает необходимость производства молока, состав которого должен соответствовать требованиям потребителя не только внутри страны, но и за ее пределами [1–4].

Введенный в действие в августе 2006 г. Государственный Стандарт Республики Беларусь регламентирует предельно допустимое количество в 1 см³ молока сорта «Экстра» микробных клеток в пределах 100 тыс., соматических – 300 тысяч. Более того, согласно изменениям № 3, внесенным в действующий стандарт от 5 мая 2015 г., в 1 см³ молока сорта «Экстра» содержание микробных, равно как и соматических, клеток не должно превышать 100 тысяч¹.

Для методического обеспечения производства молока соответствующего качества разрабатываются отраслевые регламенты и организационно-технологические требования для молочных комплексов промышленного типа, прописывающие систему мер по обеспечению молока высокого качества в условиях молочно-товарных комплексов.

Значительную роль в обеспечении производства безопасной пищевой продукции и продовольственного сырья играют системы менеджмента безопасности. К ним, прежде всего, следует отнести систему, основанную на анализе рисков и критических контрольных точек – ХАССП [5; 6]. В настоящее время данная система играет ведущую роль в обеспечении безопасности пищевой продукции в большинстве стран мира и совместно с программами обязательных предварительных мероприятий является основой стандарта ИСО 22000².

Повышению качества молока способствуют: система мер по пред- и последоильной санитарно-гигиенической обработке молочной железы; очистка молока от механических примесей в процессе его получения способами, включающими высокоэффективные фильтры различной конструкции; качественная мойка и дезинфекция доильно-молочного оборудования с использованием высокоэффективных моюще-дезинфицирующих средств; замена узлов и деталей доильных аппаратов в сроки, регламентированные паспортом по их эксплуатации [7; 8].

Существенным техническим элементом системы доения, первичной обработки и хранения молока на фермах, оказывающим влияние на уровень бактериальной обсемененности молока, являются шланги для перекачки молока от доильной установки в танк-охладитель и транспортировки из танка-охладителя в молоковоз. Данные шланги, обладающие большой длиной и площадью сечения, а следовательно, большой поверхностью, контактирующей с молоком, могут оказывать существенное влияние на уровень бактериальной обсемененности перемещаемого по ним продукта, но при этом не включены в систему СР-мойки (циркуляционной мойки) доильно-молочного оборудования, предполагающей автоматический режим мойки и дезинфекции с дозированной подачей моюще-дезинфицирующего концентрата при соответствующей температуре и продолжительности использования. Однако системных исследований степени микробной обсемененности внутренней поверхности трубопроводов или шлангов, перемещающих молоко от доильной установки к танкам-холодильникам и от холодильников к молоковозу, не проводилось. Анализ динамики накопления микроорганизмов на контактирующих с молоком поверхностях может позволить определить основные направления совершенствования технологических процессов и элементов последоильной обработки транспортных молокопроводящих путей, обеспечивающих существенное повышение качества молока (сырья) до уровня сорта «Экстра», позволяющие произвести молочные продукты с высокими потребительскими свойствами, конкурентоспособными на мировом рынке, имеют практическую значимость для производителей молока и молочной продукции [9].

Цель исследований – усовершенствовать технологический процесс обработки внутренних поверхностей молочных шлангов для перекачки молока из доильного зала в танк-охладитель и из танка-охладителя в молоковоз.

¹ Молоко коровье. Требования при закупках: СТБ 1598–2006. Минск, 2015. 11 с.

² Системы менеджмента безопасности пищевых продуктов. Требования к организациям, участвующим в пищевой цепи (ISO 22000:2005, IDT): СТБ ИСО 22000–2006. Минск, 2006. 38 с.

Для достижения поставленной цели потребовалось решение следующих задач:

провести исследования и установить режимы обработки молочного шланга для перекачки молока из доильного зала в танк-охладитель;

провести исследования и установить режимы обработки молочного шланга для перекачки молока из танка-охладителя в молоковоз;

провести комплексное изучение влияния режимов обработки молочных шлангов для перекачки молока из доильного зала в танк-охладитель и из танка-охладителя в молоковоз на санитарно-гигиенические показатели молока.

Материалы и методы исследования. Исследования проведены на базе лаборатории разработки интенсивных технологий производства молока и говядины РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по животноводству» и в условиях производства молока базового сельскохозяйственного предприятия РДУП «ЖодиноАгроПлемЭлита» Смолевичского района Минской области.

Объектом исследований являлись молокопроводящие участки доильно-молочного оборудования (молочные шланги для перекачки молока из доильного зала в танк-охладитель и молокопроводящие пути молочных шлангов для перекачки молока из танка-охладителя в молоковоз) автоматизированных доильных установок «Параллель» (МТК «Березовица»), «Елочка» (СПФ «Будагово») и «Карусель» (МТК «Рассошное»). Предмет исследований – смывы с внутренних (рабочих) поверхностей молочных шлангов для перекачки молока из доильного зала в танк-охладитель и из танка-охладителя в молоковоз, качество молока.

Проводилась сравнительная оценка влияния на бактериальную обсемененность молока шлангов из различных видов материалов (поливинилхлорида, армированные пластификатом и резины), используемых для транспортировки молока из молокоопорожнителей в танки-охладители. При этом учитывались различная длина и диаметр сечения. Принималось во внимание влияние на данные показатели объемно-планировочных особенностей доильно-молочных залов и мест расположения танков-охладителей, а также конструктивные характеристики соединений.

Преддоильная подготовка молочной железы подопытных животных, включающая стимуляцию рефлекса молокоотдачи и санитарно-гигиеническую обработку вымени, проводилась согласно требованиям п. 3 республиканского регламента «Организационно-технологические требования при производстве молока на молочных комплексах промышленного типа»¹.

Санитарную обработку доильно-молочного оборудования производили сразу же по окончании его использования. Режимы промывания молочных линий доильных установок соответствовали требованиям «Санитарных правил по уходу за доильными установками и молочной посудой, контролю их санитарного состояния и санитарного качества молока»².

Последовательность выполнения операций по санитарной обработке технологического оборудования осуществлялась в соответствии с заводской инструкцией по эксплуатации и уходу за доильной установкой.

Для промывки доильно-молочного оборудования использовались высокоэффективные моюще-дезинфицирующие средства. Система промывки доильной установки позволяла автоматически подстраиваться под смену моющих средств для основного цикла промывки, производить опционный контроль температуры и автоматический запуск программы дезинфекции.

На первом и втором этапах исследований изучена степень контаминации микроорганизмами внутренних (рабочих) поверхностей молочного шланга для перекачки молока из доильного зала в танк-охладитель и молочного шланга для перекачки молока из танка-охладителя в молоковоз, изготовленных из различных видов материалов. Проведен анализ санитарного состояния молочных шлангов для перекачки молока в период между последоильной обработкой и очередным доением. Определено влияние различной площади поверхности, контактируемой с молоком

¹ Организационно-технологические требования при производстве молока на молочных комплексах промышленного типа: респ. регламент / И. В. Брыло [и др.]. Минск, 2014. 103 с.

² Санитарные правила по уходу за доильными установками и молочной посудой, контролю их санитарного состояния и санитарного качества молока. М., 1987. 22 с.

(длины), молочных шлангов на механическую загрязненность, бактериальную обсемененность, общую (титруемую) кислотность, содержание соматических клеток в молоке-сырье.

На третьем этапе исследований выявлялась продолжительность эксплуатации молочных шлангов для перекачки молока, в пределах которой фиксировался допустимый уровень микробиологической загрязненности внутренних (рабочих) поверхностей. Отрабатывались технологические приемы механической чистки молочных шлангов для перекачки молока из доильного зала в танк-охладитель и из танка-охладителя в молоковоз с помощью трансформирующихся устройств.

На протяжении всего периода проведения исследований изучались следующие санитарно-гигиенические показатели молока: кислотность (T°) – согласно ГОСТ 3624 «Молоко и молочные продукты. Титриметрические методы определения кислотности»; механическая загрязненность (группа чистоты) – согласно ГОСТ 8018 «Молоко. Метод определения чистоты»; количество соматических клеток ($\text{тыс}/\text{см}^3$) – согласно ГОСТ 23453 «Молоко. Методы определения соматических клеток»; бактериальная обсемененность ($\text{тыс}/\text{см}^3$) – согласно ГОСТ 9235 «Молоко и молочные продукты. Методы микробиологического анализа».

Качество молока, получаемого на доильной установке, оценивали в соответствии с техническими условиями СТБ 1598-2006 «Молоко коровье. Требования при закупках» (Измененная редакция, Изм. № 3).

Полученные результаты исследований обработаны биометрически по общепринятым методам вариационной статистики с использованием компьютерной программы Microsoft Excel [10].

Результаты и их обсуждение. Результаты первого этапа исследований показали, что количество колониеобразующих единиц на 1 см^2 внутренней поверхности изделия из нитрильной резины превышало на 11,3 и 18,3 КОЕ/ см^2 , или 9,9 и 14,8 светоотражающих единиц соответствующие показатели, фиксируемые при использовании транспортирующих молоко шлангов из поливинилхлорида и поливинилхлорида, армированного пластификатом (табл. 1). По санитарному показателю, равному 34 RLU, шланг из нитрильной резины приближался к допустимому пределу (до 40 RLU).

Т а б л и ц а 1. Контаминация молочных шлангов по перекачке молока из молокоопорожнителя в танк-охладитель из различных видов материалов

T a b l e 1. Contamination of milk hoses made of different types of materials for pumping milk from the milk emptier to the cooling tank

Дата отбора проб смывов Date of sampling of swabs	Шланг поливинилхлоридный PVC hose		Шланг поливинилхлоридный армированный PVC reinforced hose		Шланг резиновый Rubber hose	
	RLU/ см^2	КОЕ/ см^2	RLU/ см^2	КОЕ/ см^2	RLU/ см^2	КОЕ/ см^2
01.07	20	25	15	18	30	36
06.07	19	22	15	18	30	36
08.07	21	26	16	19	31	37
13.07	22	27	16	19	31	37
15.07	21	26	16	18	31	37
20.07	21	26	17	19	32	38
22.07	23	28	18	20	32	38
26.07	23	27	18	20	33	39
27.07	24	28	19	21	33	39
29.07	24	29	19	22	34	40

Второй этап исследования предусматривал определение влияния контактируемой с молоком площади поверхности шлангов на механическую загрязненность, бактериальную обсемененность, общую (титруемую) кислотность, содержание соматических клеток в молоке-сырье.

Оценка влияния различной площади внутренней поверхности молочного шланга для перекачки молока в танк-охладитель на общую бактериальную обсемененность молока показала, что среднее значение показателя КОЕ проб молока, транспортируемого по молочным шлангам, имеющим площадь внутренней поверхности, равную 0,50 и 0,86 м², составило соответственно $81,2 \pm 13,1$ и $82,3 \pm 10,7$ тыс/см³ (табл. 2). Разница 1,1 КОЕ тыс/см³ несущественна и недостоверна.

Т а б л и ц а 2. Санитарно-гигиенические показатели проб молока

T a b l e 2. Sanitary and hygienic indicators of milk samples

Санитарно-гигиенические показатели молока Sanitary and hygienic indicators of milk	Площадь поверхности шланга для перекачки молока из молокоопорожнителя в танк-охладитель, м ² Surface area of the hose for pumping milk from the milk emptier to the cooling tank, m ²		
	0,50	0,86	1,55
Общая бактериальная обсемененность, КОЕ тыс/см ³	$81,2 \pm 13,1$	$82,3 \pm 10,7$	$90,1 \pm 11,4$
Кислотность, °Т	$16,3 \pm 0,25$	$16,3 \pm 0,25$	$16,8 \pm 0,50$
Механическая загрязненность, группа чистоты	1	1	1
Количество соматических клеток, тыс/см ³	$178,0 \pm 15,1$	$192,0 \pm 14,2$	$236,3 \pm 14,9$

Учитывая значительную продолжительность периодов между окончанием утренней мойки с соответствующей дезинфекцией доильно-молочного оборудования и началом последующей (вечерней) дойки, составляющей 8 ч, а между окончанием вечерней мойки (дезинфекции) доильно-молочного оборудования и утренней дойкой – 7 ч, изучена динамика контаминации шланга для транспортировки молока в танк-охладитель в данные промежутки времени. Параллельно оценивалась динамика микробной контаминации транспортного шланга в зависимости от температуры окружающей среды (в молочном блоке) в летний и осенний периоды года. Результаты исследований представлены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3. Динамика уровня контаминации шланга по перекачке молока из молокоопорожнителя в танк-охладитель между дойками

T a b l e 3. Dynamics of the contamination level of the hose for pumping milk from the milk emptier to the cooling tank between milkings

Время отбора пробы Sampling time	БиOLUMИнесцентный метод, RLU/см ² Bioluminescent method, RLU/cm ²		Референтный метод, КОЕ/см ² Reference method, CFU/cm ²	
	Летний период Summer period	Осенний период Autumn period	Летний период Summer period	Осенний период Autumn period
9.30	20	12	28	14
11.30	44	38	108	80
13.30	80	62	180	120
15.30	96	86	200	182
17.30	9	10	11	12
23.00	20	15	22	16
1.00	30	20	38	28
3.00	32	22	40	29
5.00	34	26	42	32

Анализ данных табл. 3 показывает рост уровня бактериальной обсемененности в промежутке времени между окончанием мойки и началом следующей дойки с 28 до 200 колониеобразующих единиц на 1 см², что превышает норматив ветеринарно-санитарных требований на 176 КОЕ/см².

При перекачке и прохождении молока от молочного насоса к танку-охладителю по транспортному пути площадью 1,55 м² уровень общей бактериальной обсемененности проб (включая мезофильные аэробные и факультативно анаэробные микроорганизмы) составил $90,1 \pm 11,4$ КОЕ тыс/см³. При этом разница составила 9,8 %, или 8,9 КОЕ тыс/см³. По показателям титруемой кислотности, механической загрязненности и содержанию соматических клеток молоко соответствовало сорту «Экстра». В дневной промежуток времени уровень микробной контаминации шланга для перекачки молока из молокоопорожнителя в танк-охладитель выше, чем в ночной. Установленные различия, вероятно, явились следствием более высокой температуры окружающей среды в дневное время.

Аналогичные результаты наблюдались при сравнении динамики микробной контаминации шланга для перекачки молока в осенний период. Так, максимальное количество колониеобразующих единиц на 1 см² контактируемой с молоком поверхности в летний период в дневное время достигало 200, в ночное время – 42 (табл. 3), в осенний период соответственно 182 и 32 КОЕ/см² (табл. 3).

Данные исследований, представленные в табл. 4, показывают, что санитарное состояние контактирующих с молоком поверхностей шлангов из различных видов материалов для перекачки молока из танка-охладителя в цистерну молоковоза соответствовало требованиям ветеринарно-санитарных правил (до 100 колониеобразующих единиц на 1 см²). В то же время при сравнительной оценке данного вида изделий установлено, что уровень бактериальной загрязненности внутренней поверхности шланга из поливинилхлорида армированного незначительно – на 4,0 колониеобразующие, или 3,0 светоотражающие единицы превысил аналогичные показатели, установленные при использовании шланга, изготовленного из поливинилхлорида неармированного.

Т а б л и ц а 4. Контаминация молочных шлангов по перекачке молока из различных видов материалов из танка-охладителя в молоковоз

T a b l e 4. Contamination of milk hoses made of different types of materials for pumping milk from the cooling tank to the milk truck

Дата взятия пробы Date of sample collection	Шланг по перекачке молока в цистерну молоковоза (поливинилхлорид) Milk pumping hose into a milk tanker (polyvinyl chloride)		Шланг по перекачке молока в цистерну молоковоза (поливинилхлорид армированный) Milk pumping hose into a milk truck (reinforced polyvinyl chloride)	
	RLU/см ²	КОЕ/см ²	RLU/см ²	КОЕ/см ²
01.07	14	17	16	19
06.07	14	17	16	18
08.07	15	18	18	20
13.07	15	18	19	21
15.07	16	19	19	21
20.07	17	20	22	24
22.07	18	21	25	29
26.07	22	24	28	32
27.07	25	28	30	34
29.07	29	33	32	37

Результаты исследований по оценке влияния площади внутренней поверхности выгрузных молочных шлангов на санитарно-гигиенические показатели проб молока представлены в табл. 5.

Оценка влияния различной площади внутренней поверхности шлангов по перекачке молока на общую бактериальную обсемененность молока показала, что среднее значение показателя

Т а б л и ц а 5. Санитарно-гигиенические показатели проб молока

T a b l e 5. Sanitary and hygienic indicators of milk samples

Санитарно-гигиенические показатели молока Sanitary and hygienic indicators of milk	Площадь поверхности шланга для перекачки молока из танка-охладителя в молоковоз, м ² Surface area of the hose for pumping milk from a cooling tank to a milk truck, m ²	
	1,13	1,87
Общая бактериальная обсемененность, КОЕ тыс/см ³	85,1 ± 18,5	96,1 ± 14,5
Кислотность, °Т	16,8 ± 0,25	16,5 ± 0,50
Механическая загрязненность, группа чистоты	1	1
Количество соматических клеток, тыс/см ³	229,0 ± 14,8	237,0 ± 15,1

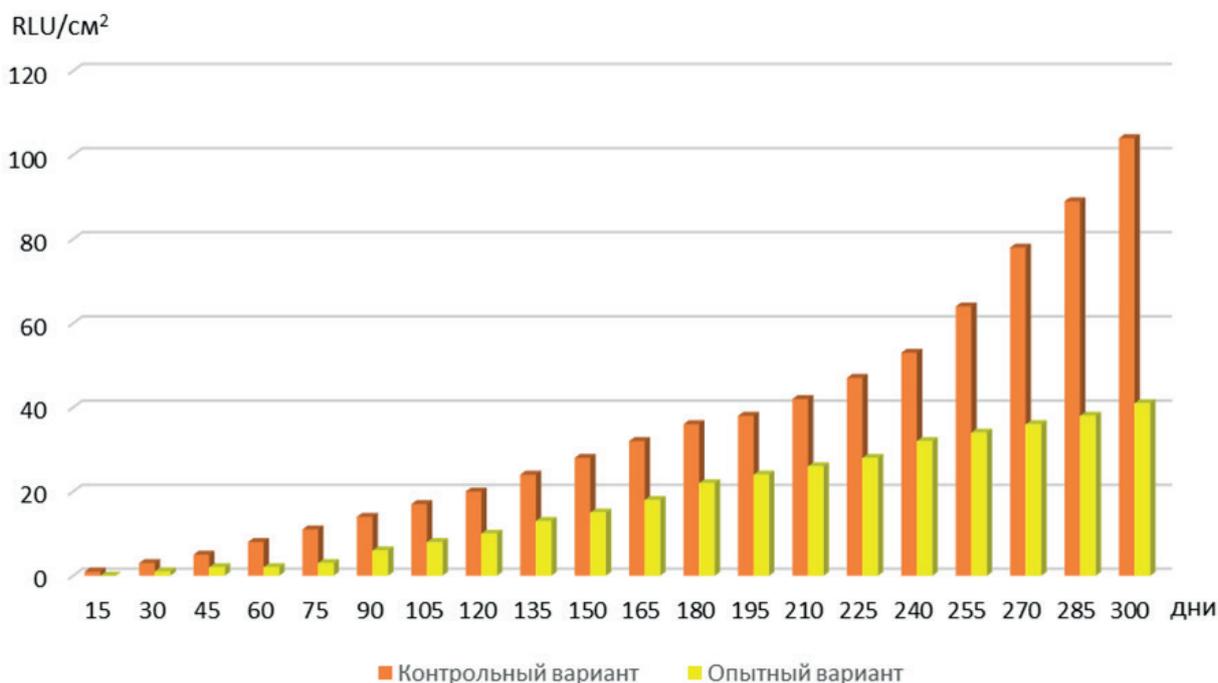
КОЕ проб молока при использовании шлангов с площадью внутренней поверхности 1,13 м² составило 85,1 ± 18,5 тыс/см³, а при прохождении его по транспортному пути площадью 1,87 м² обсеменение молока микроорганизмами увеличилось до 96,1 ± 14,5 тыс/см³.

В процессе исследований установлено, что забор молока молоковозом осуществляется, как правило, один раз в сутки и промежуток времени после мойки шланга до следующего забора молока составляет 22 ч. Учитывая достаточно большую продолжительность данного периода, потребовалось изучить динамику контаминации шланга для транспортировки молока в цистерну молоковоза в данный промежуток времени. Параллельно изучалась динамика микробной контаминации транспортного шланга в зависимости от температуры окружающей среды (в молочном блоке) в зимний и весенний периоды года. Результаты исследований представлены в табл. 6.

Т а б л и ц а 6. Динамика уровня контаминации шланга по перекачке молока из танка-охладителя в молоковоз в 22-часовой промежуток времени

T a b l e 6. Dynamics of the contamination level of the hose for pumping milk from the cooling tank to the milk truck in a 22-hour time interval

Время отбора пробы Sampling time	Биоломинесцентный метод, RLU/cm ² Bioluminescent method, RLU/cm ²	Референтный метод, КОЕ/см ² Reference method, CFU/cm ²
<i>Зимний период</i> <i>Winter period</i>		
11.00	3	7
15.00	15	19
19.00	32	35
23.00	35	39
1.00	36	42
5.00	37	45
9.00	42	52
<i>Весенний период</i> <i>Spring period</i>		
11.00	7	11
15.00	20	22
19.00	37	40
23.00	42	45
1.00	43	47
5.00	46	50
9.00	62	72



Динамика контаминации транспортных молочных шлангов по периодам эксплуатации
Dynamics of contamination of milk delivery hoses by periods of operation

Анализ данных табл. 6 показывает, что даже в зимний период эксплуатации через 22 часа наблюдается динамика повышения уровня бактериальной обсемененности молочного шланга для транспортировки молока в молоковоз – с 7 до 52 колониеобразующих единиц на 1 см². Следует отметить, что в ночное время показатель бактериальной обсемененности практически не изменялся. В весенний период эксплуатации, при более высоких температурах 15–20 °С, динамика изменения контаминации испытуемого шланга несколько изменилась. Так, уровень бактериальной загрязненности с 11 повысился до 72 КОЕ/см². Следует отметить, что контаминация шланга заметно повышалась в дневные часы, когда температура окружающей среды достигала своего максимума.

Более наглядно динамика изменения уровня бактериальной загрязненности транспортных молочных шлангов контрольной и опытной групп в зависимости от сроков эксплуатации представлена на рисунке.

Установлено, что по мере увеличения сроков эксплуатации выгрузных молочных шлангов наблюдалось стабильное увеличение микробной обсемененности контактируемой с молоком поверхности. Следует отметить, что и уровень микробной загрязненности транспортного шланга, подвергавшегося механической чистке трансформирующейся системой на протяжении всего периода исследований, был в 1,8 раза ниже, чем шланга, обрабатываемого традиционным способом.

Комплексное изучение влияния режимов обработки молочных шлангов для перекачки молока из доильного зала в танк-охладитель и из танка-охладителя в молоковоз на санитарно-гигиенические показатели молока показало не достаточную эффективность применяемых методов. Анализ степени влияния отдельных элементов процесса очистки шлангов позволил разработать усовершенствованный вариант, включающий следующие операции: ополаскивание от остатков молока проточной водой, механическая чистка специальной трансформирующейся системой, мойка щелочным раствором, ополаскивание водой, мойка кислотным раствором и ополаскивание водой от остатков моющего раствора.

Экспериментальным путем установлено количество протяжек трансформирующейся системы для механической очистки молокопроводящих путей шланга в зависимости от его первичной контаминации. При проведении данной операции протяжка должна происходить в одном направлении, чтобы избежать заклинивания ерша в шланге. Перед протяжкой трансформирующейся системы в транспортный шланг заливается 2–3 л моющего раствора, используемого при циркуляционной мойке доильной установки. После выполнения чистки и обработки моющим раствором все элементы трансформирующейся системы подвергаются ополаскиванию проточной водой.

Исследования по оценке уровня контаминации биоорганическими загрязнителями при использовании усовершенствованного метода очистки в сравнении с традиционно применяемым проводились через каждые пятнадцать дней. Результаты исследований представлены в табл. 7.

Анализ данных показывает, что усовершенствованный способ санитарной обработки транспортного молочного шланга положительно отразился на его контаминации. Сравнительная оценка двух вариантов санитарной обработки транспортных шлангов убедительно показала преимущество усовершенствованного способа над традиционно применяемым в данном хозяйстве по производству молока. Установлено, что предельно допустимый уровень контаминации молочного шланга в контрольном варианте санитарной обработки (40 RLU) был на 200-й день его эксплуатации, а в усовершенствованном – на 300-й. Разница составила 100 дней. Следует отметить, что и уровень микробной загрязненности транспортного шланга, подвергавшегося механической чистке трансформирующейся системой на протяжении всего периода исследований, был в 1,8 раза ниже, чем шланга, обрабатываемого традиционным способом.

Таблица 7. Контаминация транспортных молочных шлангов при различных вариантах их санитарной обработки и в зависимости от срока их эксплуатации

Table 7. Contamination of milk delivery hoses at different variants of their sanitization and depending on their service life

Срок эксплуатации, дни Service life, days	Контрольный вариант (МТК «Березовица») Control variant (DCC “Berezovitsa”)		Усовершенствованный вариант (МТК «Рассошное») Improved version (DCC “Rassoshnoye”)	
	RLU/cm ²	KOE/cm ²	RLU/cm ²	KOE/cm ²
15	1	2	0	0
30	3	6	1	2
45	5	10	2	5
60	8	15	2	6
75	11	19	3	8
90	14	26	6	12
105	17	30	8	14
120	20	38	10	18
135	24	46	13	24
150	28	52	15	28
165	32	62	18	32
180	36	74	22	40
195	38	82	24	46
210	42	97	26	52
225	47	106	28	59
240	53	117	32	64
255	64	125	34	72
270	78	138	36	76
285	89	155	38	84
300	104	170	41	92

Заклучение. Проведенные исследования позволили установить, что молочные шланги по перекачке молока в танк-охладитель, изготовленные из различных видов материалов, в разной степени контаминированы микроорганизмами. Так, по уровню бактериальной обсемененности внутренней поверхности шланг для транспортировки молока в танк-охладитель, изготовленный из нитрильной резины, превысил в среднем за период исследований два других изделия – из поливинилхлорида и поливинилхлорида, армированного пластификатом, соответственно на 11,3 и 18,3 колониеобразующих единиц на 1 см^2 (КОЕ/ см^2), или 9,9 и 14,8 светоотражающих единиц (RLU). По санитарному показателю, равному 34 RLU, шланг из нитрильной резины приближался к допустимому пределу (до 40 RLU), в связи с чем его дальнейшая эксплуатация рекомендуется лишь в исключительных случаях.

При оценке шлангов для транспортировки молока из танка-охладителя в цистерну молоковоза, изготовленных из поливинилхлорида и поливинилхлорида, армированного металлом, установлено, что уровень бактериальной загрязненности внутренней поверхности шланга из поливинилхлорида армированного незначительно – на 4,0 колониеобразующие, или 3,0 светоотражающие единицы превысил в среднем за период зимне-весеннего использования шланг, изготовленный из поливинилхлорида неармированного, и составил соответственно 37 КОЕ/ см^2 (норма до 100 КОЕ/ см^2) и 33 RLU (норма до 40 RLU).

Установлено влияние различной площади внутренней поверхности молочного шланга для перекачки молока в танк-охладитель на общую бактериальную обсемененность молока. Так, среднее значение показателя КОЕ проб молока, транспортируемого по молочным шлангам, имеющим площадь внутренней поверхности, равную 0,50 и 0,86 м^2 , составило соответственно $81,2 \pm 13,1$ и $82,3 \pm 10,7$ тыс/ см^3 (разница 1,1 КОЕ тыс/ см^3). При перекачке и прохождении молока от молочного насоса к танку-охладителю по транспортному пути площадью 1,55 м^2 уровень общей бактериальной обсемененности проб (включая мезофильные аэробные и факультативно анаэробные микроорганизмы) составил $90,1 \pm 11,4$ КОЕ тыс/ см^3 .

Среднее значение показателя КОЕ проб молока, транспортируемого по шлангам для перекачки молока из танка-охладителя в молоковоз, имеющим площадь внутренней поверхности, равную 1,13 м^2 , составило $85,1 \pm 18,5$ тыс/ см^3 , а при перекачке по транспортному пути площадью 1,87 м^2 обсеменение молока микроорганизмами увеличилось до $96,1 \pm 14,5$ КОЕ тыс/ см^3 . Разница составила 11,0 КОЕ тыс/ см^3 , или 11,4 %.

Установлена динамика повышения уровня контаминации транспортного пути молочного ПВХ шланга по перекачке молока в цистерну молоковоза в промежутке времени после мойки до следующего забора молока – от 7 до 52 колониеобразующих единиц на 1 см^2 .

Выявлено, что по мере увеличения сроков эксплуатации выгрузных молочных шлангов наблюдается увеличение содержания микробных клеток на контактируемой с молоком поверхности. При этом уровень контаминации транспортного шланга, подвергавшегося механической чистке трансформирующейся системой на протяжении всего периода исследований, был в 1,8 раза ниже, чем шланга, обрабатываемого традиционным способом.

Экспериментально доказано, что санитарная обработка транспортного молочного шланга после завершения перекачки молока в молоковоз с применением усовершенствованного технологического процесса механической очистки, осуществляемого с помощью специального устройства, обеспечивает высокий санитарно-гигиенический уровень данного участка молокопроводящей системы. Так, контаминация 1 см^2 внутренней поверхности выгрузного молочного шланга составила 2–7 RLU (4–12 КОЕ/ см^2), что значительно ниже, чем в контрольном варианте, где механическая чистка не применялась – 29–61 RLU (32–52 КОЕ/ см^2) соответственно.

Список использованных источников

1. Кирейшин, А. Мировой рынок молочной: какие позиции у Беларуси? / А. Кирейшин // MyFin.by [Электронный ресурс]. – 2012–2024. – Режим доступа: <https://myfin.by/stati/view/mirovoj-rynok-molocki-kakie-pozicii-u-belarusi>. – Дата доступа: 25.01.2024.

2. Смирнов, А. В. Организация ветеринарно-санитарной экспертизы сырого молока, требования нормативных документов к показателям безопасности качества молока / А. В. Смирнов // Нормативно-правовое регулирование в ветеринарии. – 2023. – № 4. – С. 33–36. <https://doi.org/10.52419/issn2782-6252.2023.4.33>
3. Мировой и отечественный опыт в развитии рынка молока и молочных продуктов / Н. М. Сурай [и др.] // Экономические науки. – 2019. – № 2(171). – С. 71–79. <https://doi.org/10.14451/1.171.71>
4. Stukenberg, D. Major Advances in Milk Marketing: Government and Industry Consolidation / D. Stukenberg, D. Blayney, J. Miller // *J. Dairy Sci.* – 2006. – Vol. 89, N 4. – P. 1195–1206. [https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302\(06\)72189-0](https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302(06)72189-0)
5. Система технологического самоконтроля санитарного состояния молокопроводящих участков доильно-молочного оборудования, основанного на принципах HACCP / М. В. Барановский [и др.]. – Жодино, 2020. – 15 с.
6. Расторгуев, П. В. Обеспечение качества и безопасности молочного сырья на основе внедрения принципов HACCP / П. В. Расторгуев, И. Г. Почтовая // *Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. аграр. наук.* – 2007. – № 1. – С. 27–32.
7. Harwood, W. S. Manufacture of milk and whey products: impact of processing on sensory characteristics of milk and dairy products / W. S. Harwood, M. A. Drake // *Encyclopedia of Dairy Sciences* (3d ed.). – 2022. – Vol. 4. – P. 103–117. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-818766-1.00110-0>
8. К вопросу о санитарном состоянии молокопроводящей системы доильных установок / О. А. Кажико [и др.] // *Эпизоотология. Иммунология. Фармакология. Санитария.* – 2022. – № 1. – С. 75–81. <https://doi.org/10.47612/2224-168x-2022-1-75-81>
9. Кажико, О. А. Влияние различной длины молочных шлангов на санитарно-гигиенические показатели молока / О. А. Кажико, М. В. Барановский // *Зоотехническая наука Беларуси.* – 2022. – Т. 57, ч. 2. – С. 110–121. <https://doi.org/10.47612/0134-9732-2022-57-2-110-121>
10. Рокицкий, П. Ф. Введение в статистическую генетику / П. Ф. Рокицкий. – Минск, 1978. – 447 с.

References

1. Kireyshin A. The global dairy market: what positions does Belarus have? *MyFin.by*, 2012–2024. Available at: <https://myfin.by/stati/view/mirovoj-rynok-molocki-kakie-pozicii-u-belarusi> (accessed 25 January 2024) (in Russian).
2. Smirnov A. V. Organization of veterinary and sanitary examination of raw milk, requirements of normative documents for milk quality safety indicators. *Voprosy normativno-pravovogo regulirovania v veterinarii = Legal regulation in veterinary medicine*, 2023, no. 4, pp. 33–36 (in Russian). <https://doi.org/10.52419/issn2782-6252.2023.4.33>
3. Surai N. M., Nosov V. V., Dibrova Zh. N., Bobkov A. N., Aidinov H. T. World and domestic experience in the development of the milk and dairy products market. *Ekonomicheskie nauki* [Economic Sciences], 2019, no. 2(171), pp. 71–79 (in Russian). <https://doi.org/10.14451/1.171.71>
4. Stukenberg D., Blayney D., Miller J. Major advances in milk marketing: government and industry consolidation. *Journal of Dairy Science*, 2006, vol. 89, no. 4, pp. 1195–1206. [https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302\(06\)72189-0](https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302(06)72189-0)
5. Baranovsky M. V., Kazheko O. A., Kurak A. S., Zalesskaya M. G., Brylo I. V., Sonich N. A. *The system of technological self-control of the sanitary condition of milk-carrying sections of milking and dairy equipment based on the principles of HACCP*. Zhodino, 2020. 15 p. (in Russian).
6. Rastorguev P. V., Pochtovaya I. G. Ensuring the quality and safety of dairy raw materials based on the implementation of the principles of HACCP. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2007, no. 1, pp. 27–32 (in Russian).
7. Harwood W. S., Drake M. A. Manufacture of milk and whey products: impact of processing on sensory characteristics of milk and dairy products. *Encyclopedia of dairy sciences* (3d ed.), 2022, vol. 4, pp. 103–117. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-818766-1.00110-0>
8. Kazheko O. A., Baranovsky M. V., Musica A. A., Vysotsky A. E. On the sanitary condition of the milk transfer system of milking machines. *Epizootologiya. Immunobiologiya. Farmakologiya. Sanitariya = Epizootology. Immunobiology. Pharmacology. Sanitation*, 2022, no. 1, pp. 75–81 (in Russian). <https://doi.org/10.47612/2224-168x-2022-1-75-81>
9. Kazheko O. A., Baranovsky M. V. Influence of different lengths of milk hoses on sanitary and hygienic indicators of milk. *Zootekhnicheskaya nauka Belarusi = Zootechnical Science of Belarus*, 2022, vol. 57, no. 2, pp. 110–121 (in Russian). <https://doi.org/10.47612/0134-9732-2022-57-2-110-121>
10. Rokitsky P. F. *Introduction to statistical genetics*. Minsk, 1978. 447 p. (in Russian).

Информация об авторах

Тимошенко Владимир Николаевич – член-корреспондент, д-р с.-х. наук, профессор, первый заместитель генерального директора. НПЦ НАН Беларуси по животноводству (ул. Фрунзе, 11, 222163, Жодино, Республика Беларусь). E-mail: belniig@tut.by.

Барановский Михаил Васильевич – д-р с.-х. наук, профессор, гл. науч. сотрудник. НПЦ НАН Беларуси по животноводству (ул. Фрунзе, 11, 222163, Жодино, Республика Беларусь). E-mail: belniig@tut.by.

Кажеко Ольга Адамовна – канд. с.-х. наук, доцент, вед. науч. сотрудник. НПЦ НАН Беларуси по животноводству (ул. Фрунзе, 11, 222163, Жодино, Республика Беларусь). E-mail: belniig@tut.by.

Портной Александр Иванович – канд. с.-х. наук, доцент, генеральный директор. НПЦ НАН Беларуси по животноводству (ул. Фрунзе, 11, 222163, Жодино, Республика Беларусь). E-mail: belniig@tut.by.

Музыка Андрей Анатольевич – канд. с.-х. наук, доцент, заведующий лабораторией. НПЦ НАН Беларуси по животноводству (ул. Фрунзе, 11, 222163, Жодино, Республика Беларусь). E-mail: belniig@tut.by.

Information about the authors

Tsimoshanka Uladzimir N. – Corresponding Member, D. Sc. (Agrarian), Professor, First Deputy Director General. Research and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Animal Breeding (11, Frunze Str., 222160, Zhodino, Minsk region, Republic of Belarus). E-mail: belniig@tut.by.

Baranovsky Mikhail V. – D. Sc. (Agrarian), Professor, Chief Researcher. Research and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Animal Breeding (11, Frunze Str., 222160, Zhodino, Minsk region, Republic of Belarus). E-mail: belniig@tut.by.

Kazheko Olga A. – Ph. D. (Agrarian), Associate Professor, Leading Researcher. Research and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Animal Breeding (11, Frunze Str., 222160, Zhodino, Minsk region, Republic of Belarus). E-mail: belniig@tut.by.

Partny Aliaksandr I. – Ph. D. (Agrarian), Associate Professor, Director General. Research and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Animal Breeding (11, Frunze Str., 222160, Zhodino, Minsk region, Republic of Belarus). E-mail: belniig@tut.by.

Muzyka Andrei A. – Ph. D. (Agrarian), Associate Professor, Head of the Laboratory. Research and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Animal Breeding (11, Frunze Str., 222160, Zhodino, Minsk region, Republic of Belarus). E-mail: belniig@tut.by.