

ДОКЛАДЫ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ

2025. Т. 69. № 3

Выходит шесть номеров в год

Журнал основан в июле 1957 года

Учредитель – Национальная академия наук Беларуси

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

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

Главный редактор

Владимир Григорьевич Гусаков

академик 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. Волоотовский, 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, Абертейский университет, Соединенное Королевство Великобритании и Северной Ирландии

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

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

- Н. С. Казак**, 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. Маркхам, 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. 2025. Т. 69. № 3

Выходит на русском, белорусском и английском языках

Редактор Т. П. Петрович

Компьютерная верстка И. В. Счеснюк

Сдано в набор 19.06.2025. Выпуск в свет 27.06.2025. Формат 60×84¹/₈. Бумага офсетная. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 10,23 Уч.-изд. л. 11,3. Тираж 138 экз. Заказ 124.

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

Издатель и полиграфическое исполнение:

Республиканское унитарное предприятие «Издательский дом «Беларуская навука».

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

© РУП «Издательский дом «Беларуская навука».
Доклады НАН Беларуси, 2025

DOKLADY OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS

2025. Vol. 69. No. 3

Published bimonthly

The journal has been published since July, 1957

Founder – National Academy of Sciences of Belarus

The journal is registered on May 18, 2009 by the Ministry of Information of the Republic of Belarus
in the State Registry of Mass Media, reg. no. 387.

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

Editor-in-Chief

Vladimir G. Gusakov

Academician 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. Rashal, 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. 2025. Vol. 69. No. 3

Printed in Russian, Belarusian and English languages

Editor T. P. Petrovich
 Computer Imposition I. V. Schasniuk

Sent for press 19.06.2025. Output 27.06.2025. Format 60×84¹/₈. Offset paper.
 Digital press. Printed sheets 10.23. Publisher's signatures 11.3. Circulation 138 copies. Order 124.

Price: individual subscription – 14.48 BYN, departmental subscription – 33.64 BYN.

Publisher and printing execution:

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

МАТЕМАТИКА

- Деменчук А. К.** Управление асинхронным спектром линейных периодических систем с вырожденным правым нижним диагональным блоком усреднения матрицы коэффициентов 183

ФИЗИКА

- Лановский Р. А., Мантыцкая О. С., Терешко Н. В., Бушинский М. В., Чобот А. Н., Никитин А. В., Игнатенко О. В.** Магнитные свойства синтезированных под высоким давлением кобальтитов $\text{Sr}_{0,8}\text{Eu}_{0,2}\text{Co}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}_{3-d}$ ($x = 0; 0,05$) (на англ. яз.) 192

ХИМИЯ

- Гайдаш А. А., Кулак А. И., Крутько В. К., Мусская О. Н., Скроцкая К. В., Крутько Е. Н.** Структурирование и физико-химические аспекты минерализации коллагеновых скаффолдов 198
- Ратько А. А., Шевчук В. В., Дуко Ю. В., Крутько Н. П.** Способ дезодорации и обеззараживания куриного помета с целью его применения при производстве органоминеральных удобрений 206

БИОЛОГИЯ

- Гудная Н. В., Мялик А. Н., Титок В. В.** Генетическое разнообразие белорусских популяций лосняка Лезеля (*Liparis loeselii* (L.) Rich. (Orchidaceae)) (на англ. яз.) 214

МЕДИЦИНА

- Пашкевич С. Г., Гордынец С. А., Чернявская Л. А., Кусонская Т. В., Тихонович О. Г., Пыж А. Э., Гладкова Ж. А., Соболева О. Е., Демина Я. Д., Ксенович Ю. В., Волков А. В., Токальчик Д. П., Сердюченко Н. С.** Корректирующий рацион в модели алиментарного ожирения 222

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Кусин Р. А., Дечко М. М., Черняк И. Н., Кусин А. Р., Рутковская Н. В.** Оптимизация конструкции фильтров с ортотропной структурой на основе тканых сеток при ограниченных возможностях варьирования управляющими факторами 234
- Демух Е. С., Пенязьков О. Г., Фисенко С. П.** Неизотермическая нуклеация и формирование кластеров SiO_2 242

СОЦИАЛЬНО-ГУМАНИТАРНЫЕ НАУКИ

- Кобяк О. В.** Социальные факторы распространения цифровых технологий в повседневных практиках населения Республики Беларусь: опыт социологического исследования 248

АГРАРНЫЕ НАУКИ

- Лапа В. В., Михайловская Н. А., Погирицкая Т. В.** Способность калиймобилизующих бактерий *Bacillus* метаболизировать гербицид глифосат с образованием метилглицина 258

CONTENTS

MATHEMATICS

- Demenchuk A. K.** Control problem of the asynchronous spectrum of linear periodic systems with degenerate right lower diagonal block of averaging of coefficient matrix 183

PHYSICS

- Lanovsky R. A., Mantytskaya O. S., Tereshko N. V., Bushinsky M. V., Chobot A. N., Nikitin A. V., Ignatenko O. V.** Magnetic properties of high-pressure synthesized $\text{Sr}_{0.8}\text{Eu}_{0.2}\text{Co}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}_{3-d}$ ($x = 0; 0.05$) cobaltites 192

CHEMISTRY

- Gaidash A. A., Kulak A. I., Krut'ko V. K., Musskaya O. N., Skrotskaya K. V., Krutsko E. N.** Physicochemical aspects of structuring calcium phosphate on fibrillary collagen scaffolds 198

- Rat'ko A. A., Shevchuk V. V., Duko Yu. V., Krut'ko N. P.** Method of deodorization and disinfection of chicken manure for its use in the production of organo-mineral fertilizers 206

BIOLOGY

- Hudnaya N. V., Mialik A. N., Titok V. V.** Genetic diversity of Belarusian populations of *Liparis loeselii* (L.) Rich. (Orchidaceae) 214

MEDICINE

- Pashkevich S. G., Gordynets S. A., Chernyavskaya L. A., Kusonskaya T. V., Tikhonovich O. G., Pyzh A. E., Gladkova Zh. A., Soboleva O. E., Dyomina Ya. D., Ksenevich J. V., Volkov A. V., Tokalchik D. P., Serdyuchenko N. S.** The corrective diet of alimentary obesity model 222

TECHNICAL SCIENCES

- Kusin R. A., Dechko M. M., Charniak I. M., Kusin A. R., Rutkovskaya N. V.** Optimization of the design of filters with orthotropic structure on the basis of woven meshes at limited possibilities of control factors variation 234

- Demukh E. S., Penyazkov O. G., Fisenko S. P.** Nonisothermal nucleation and formation of SiO_2 clusters 242

SOCIAL SCIENCES AND HUMANITIES

- Kabiak A. V.** Social factors of distribution of digital technologies in the everyday practices of the population of the Republic of Belarus: experience of sociological research 248

AGRARIAN SCIENCES

- Lapa V. V., Mikhailovskaya N. A., Pahirnitskaya T. V.** Rhizosphere K-mobilizing bacteria *Bacillus* capability of glyphosate metabolization with methylglycyn formation 258

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

МАТЕМАТИКА
MATHEMATICS

УДК 517.925
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2025-69-3-183-191>

Поступило в редакцию 29.01.2025
Received 29.01.2025

А. К. Деменчук

Институт математики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

**УПРАВЛЕНИЕ АСИНХРОННЫМ СПЕКТРОМ
ЛИНЕЙНЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ВЫРОЖДЕННЫМ
ПРАВЫМ НИЖНИМ ДИАГОНАЛЬНЫМ БЛОКОМ
УСРЕДНЕНИЯ МАТРИЦЫ КОЭФФИЦИЕНТОВ**

(Представлено академиком Н. А. Изобовым)

Аннотация. Рассматривается линейная система управления с периодической матрицей коэффициентов и программным управлением. Матрица при управлении постоянная, прямоугольная и ее ранг не является максимальным. Предполагается, что управление является периодическим, при этом модуль его частот, т. е. наименьшая аддитивная группа вещественных чисел, включающая все показатели Фурье этого коэффициента, содержится в частотном модуле матрицы коэффициентов. Ставится следующая задача: выбрать такое управление из допустимого множества, чтобы у системы появились периодические решения, спектр частот (множество показателей Фурье) которых содержит наперед заданное подмножество, а пересечение модулей частот решения и матрицы коэффициентов тривиально. Поставленная задача названа задачей управления асинхронным спектром с целевым множеством частот. Решение сформулированной задачи существенным образом зависит от структуры среднего значения матрицы коэффициентов. К настоящему времени такая задача решена для систем с нулевым средним. Кроме того, изучен случай, когда у матрицы при управлении есть нулевые строки, усреднение матрицы коэффициентов имеет вырожденный левый верхний диагональный блок, а остальные ее блоки – нулевые. Вопрос для системы с вырожденным правым нижним блоком усреднения оставался открытым. В настоящей работе для указанного класса систем исследуется задача управления асинхронным спектром. Установлено, в частности, что для ее разрешимости необходимо, чтобы блок, образованный первыми строками матрицы коэффициентов, имел неполный столбцовый ранг.

Ключевые слова: периодические линейные системы управления, среднее значение, показатели Фурье, асинхронный спектр

Для цитирования. Деменчук, А. К. Управление асинхронным спектром линейных периодических систем с вырожденным правым нижним диагональным блоком усреднения матрицы коэффициентов / А. К. Деменчук // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2025. – Т. 69, № 3. – С. 183–191. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2025-69-3-183-191>

Aleksandr K. Demenchuk

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

**CONTROL PROBLEM OF THE ASYNCHRONOUS SPECTRUM
OF LINEAR PERIODIC SYSTEMS WITH DEGENERATE RIGHT LOWER DIAGONAL BLOCK
OF AVERAGING OF COEFFICIENT MATRIX**

(Communicated by Academician Nikolay A. Izobov)

Abstract. The present study considers a linear control system with a periodic matrix of coefficients and program control. The matrix under control is constant, rectangular, and its rank is not maximum. It is assumed that the control is periodic, and that the modulus of its frequencies, i. e. the smallest additive group of real numbers, including all the Fourier exponents

of this coefficient, is contained in the frequency modulus of the coefficient matrix. The following problem is posed: to select such a control from an admissible set that the system would have periodic solutions, the frequency spectrum (the set of Fourier exponents) of which contains a predetermined subset, and the intersection of the modules of the frequencies of the solution and the matrix of coefficients is trivial. The posed problem can thus be termed the ‘problem of control of the asynchronous spectrum with the target set of frequencies’. The solution to the posed problem essentially depends on the structure of the average value of the matrix of coefficients. To date, this problem has been solved for systems with zero mean. In addition, the case is studied when the matrix under control has zero rows, the averaging of the matrix of coefficients has a degenerate left upper diagonal block, and the rest of its blocks are zero. The question for a system with a nontrivial right lower averaging block remained open. In the present work, we study the problem of control of the asynchronous spectrum for the indicated class of systems. It has been established, in particular, that for the solvability of this problem it is necessary that the block formed by the rows of the matrix of coefficients has an incomplete column rank.

Keywords: periodic linear control systems, mean value, Fourier exponents, asynchronous spectrum

For citation. Demenchuk A. K. Control problem of the asynchronous spectrum of linear periodic systems with degenerate right lower diagonal block of averaging of coefficient matrix. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2025, vol. 69, no. 3, pp. 183–191 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2025-69-3-183-191>

Введение. Рассмотрим линейную систему управления

$$\dot{x} = A(t)x + Bu, \quad t \in \mathbb{R}, \quad x \in \mathbb{R}^n, \quad n \geq 2, \quad (1)$$

в которой $A(t)$ – непрерывная ω -периодическая $(n \times n)$ -матрица; B – постоянная $(n \times r)$ -матрица $r \leq n$; u – управление. Вопросы управляемости линейных систем изучались во многих работах в предположении совпадения частот решения и самой системы [1; 2].

Вместе с тем, как показали Х. Массера [3], Я. Курцвейль и О. Вейвода [4] и др., система обыкновенных дифференциальных периодических (почти периодических) уравнений может допускать решения, пересечение частотного модуля которых с модулем частот системы тривиально. Позднее такого рода решения были названы сильно нерегулярными, их частотный спектр – асинхронным, а описываемые ими колебания – асинхронными. Отметим, что в периодическом случае нерегулярность означает несоизмеримость периодов решения и системы.

Задача построения периодических дифференциальных систем, обладающих сильно нерегулярными решениями, сформулирована в [5] как задача управления асинхронным спектром. В [6, гл. III] исследована разрешимость такой задачи для некоторых классов линейных периодических систем с линейной по фазовым переменным периодической обратной связью.

В данной работе в качестве управляющего воздействия $u(\cdot)$ в системе (1) будем использовать непрерывные на вещественной оси периодические r -вектор-функции, множество показателей Фурье которых $\text{Exp}(u)$ содержится в модуле частот $\text{Mod}(A)$ матрицы коэффициентов $A(\cdot)$. Тогда применительно к системе (1) задача управления асинхронным спектром с целевым множеством L состоит в следующем: выбрать такое программное управление

$$u = U(t)$$

из указанного допустимого множества, чтобы система

$$\dot{x} = A(t)x + Bu(t) \quad (2)$$

имела сильно нерегулярное периодическое решение с заданным спектром частот L (целевым множеством).

Вопросы разрешимости сформулированной задачи для системы (1) с программным управлением и нулевым средним значением матрицы коэффициентов исследованы в [7], а с невырожденным средним – в [8]. Случай максимального ранга матрицы при управлении, который равен числу ее столбцов, изучен в [9]. В [10] рассмотрена система (1) с нулевыми строками матрицы при управлении, при этом среднее значение матрицы коэффициентов имеет невырожденный левый верхний диагональный блок и остальные ее блоки – нулевые. Вопрос исследования системы (1) с нетривиальным правым нижним блоком усреднения матрицы коэффициентов оставался открытым. В настоящем сообщении приведем решение задачи управления асинхронным спектром в случае, когда указанный диагональный блок является вырожденным.

Необходимые обозначения и постановка задачи. Пусть $P = (p_{ij})$, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, m}$, – некоторая матрица и $1 \leq k_1 < \dots < k_s \leq n$, $1 \leq l_1 < \dots < l_q \leq m$ – две упорядоченные последовательности натуральных чисел. Через $P_{k_1 \dots k_s}^{l_1 \dots l_q}$ обозначим матрицу размера $s \times q$, образованную из элементов матрицы P , стоящих на пересечении строк с номерами $k_1, \dots, k_s$ и столбцов с номерами $l_1, \dots, l_q$

$$P_{k_1 \dots k_s}^{l_1 \dots l_q} = \begin{pmatrix} p_{k_1 l_1} & \dots & p_{k_1 l_q} \\ \dots & \dots & \dots \\ p_{k_s l_1} & \dots & p_{k_s l_q} \end{pmatrix}.$$

Для непрерывной на всей числовой оси ω -периодической вещественнозначной матрицы (вектора) $F(t)$ определим ее среднее значение

$$\hat{F} = \frac{1}{\omega} \int_0^\omega F(t) dt$$

и осциллирующую часть $\tilde{F}(t) = F(t) - \hat{F}$. Пусть $\text{Mod}(F)$ – модуль частот матрицы $F(t)$, т. е. множество всевозможных линейных комбинаций с целыми коэффициентами показателей Фурье этой матрицы. Через $\text{rank}_{\text{col}} F$ обозначим столбцовый ранг матрицы $F(t)$ – наибольшее число ее линейно независимых столбцов. Подобным образом можно определить и строчный ранг матрицы. Очевидно, что в общем случае строчный и столбцовый ранги матрицы $F(t)$ не обязаны совпадать. Будем говорить, что $F(t)$ – матрица неполного столбцового ранга, если ее столбцовый ранг меньше числа столбцов.

Принимая во внимание основной результат работы [9] далее считаем, что ранг матрицы B не является максимальным, т. е. меньше числа ее столбцов, и строки с номерами $k_1, \dots, k_d$, $1 \leq k_1 < \dots < k_d \leq n$, нулевые

$$\text{rank} B = r_1 < r, \quad B_{k_1 \dots k_d}^{1 \dots r} = 0 \quad (d = n - r_1). \quad (3)$$

Последнее ограничение не является потерей общности рассуждений, так как этого можно добиться с помощью линейной неособенной замены переменных системы (1), используя алгоритмы элементарных преобразований строк матрицы.

Будем также предполагать, что среднее значение матрицы коэффициентов представимо в виде

$$\hat{A} = \begin{pmatrix} \hat{A}_{k_1 \dots k_d}^{k_1 \dots k_d} & \hat{A}_{k_1 \dots k_d}^{k_{d+1} \dots k_n} \\ \hat{A}_{k_{d+1} \dots k_n}^{k_1 \dots k_d} & \hat{A}_{k_{d+1} \dots k_n}^{k_{d+1} \dots k_n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \hat{A}_{k_{d+1} \dots k_n}^{k_{d+1} \dots k_n} \end{pmatrix}, \quad \hat{A}_{k_{d+1} \dots k_n}^{k_{d+1} \dots k_n} = \text{diag}(\hat{a}_{k_{d+1} k_{d+1}}, \dots, \hat{a}_{k_n k_n}), \quad (4)$$

причем, считаем, что среди диагональных элементов правого нижнего блока $\hat{A}_{k_{d+1} \dots k_n}^{k_{d+1} \dots k_n}$ имеются нулевые, т. е. он является вырожденным. Без ограничения общности допускаем, что нулевые элементы стоят в начале диагонали

$$\hat{a}_{k_{d+j} k_{d+j}} = 0, \quad j = \overline{1, m}, \quad 1 \leq m < n - d, \quad (5)$$

поскольку этого можно добиться с помощью перестановки последних $n - d$ уравнений системы (1) в требуемом порядке.

В настоящем сообщении для описанного класса систем (1) исследуем вопрос о разрешимости задачи управления асинхронным спектром.

Основной результат. Пусть $k_{d+1}, \dots, k_n$, $1 \leq k_{d+1} < \dots < k_n \leq n$, – номера ненулевых строк матрицы B . С учетом нумерации нулевых и ненулевых строк этой матрицы для упрощения записи примем следующие обозначения:

$$A_{11}(t) = A_{k_1 \dots k_d}^{k_1 \dots k_d}(t), \quad A_{12}(t) = A_{k_1 \dots k_d}^{k_{d+1} \dots k_n}(t), \quad A_{21}(t) = A_{k_{d+1} \dots k_n}^{k_1 \dots k_d}(t), \quad A_{22}(t) = A_{k_{d+1} \dots k_n}^{k_{d+1} \dots k_n}(t),$$

$$x' = \text{col}(x_{k_1}, \dots, x_{k_d}), \quad x'' = \text{col}(x_{k_{d+1}}, \dots, x_{k_n}).$$

Если у некоторого вектора $(\cdot)$ произвольным образом поменять местами его элементы, то через $\text{ord}_{\text{row}}(\cdot)$ обозначим обратную процедуру упорядочивания элементов по возрастанию их номеров. Тогда, в частности, будем иметь $\text{ord}_{\text{row}}(\text{col}(x', x'')) = x$.

Применительно к матрице при управлении B для краткости положим

$$B_{11} = B_{k_1 \dots k_d}^{1 \dots r}, \quad B_{21} = B_{k_{d+1} \dots k_n}^{1 \dots r}.$$

Из условия (3) вытекает, что $(d \times r)$ -матрица B_{11} нулевая, а $(r_1 \times r)$ -матрица B_{21} , составленная из ненулевых строк матрицы B с номерами $1 \leq k_{d+1} < \dots < k_n \leq r$, имеет максимальный ранг, равный числу ее строк

$$\text{rank } B_{21} = r_1. \quad (6)$$

Через $A^{(1)}(t)$ обозначим $(d \times n)$ -матрицу, составленную из матриц $A_{11}(t)$, $A_{12}(t)$. Иначе говоря, матрица $A^{(1)}(t)$ образована строками матрицы коэффициентов $A(t)$ с номерами $k_1, \dots, k_d$.

Справедлива

Т е о р е м а. Для класса линейных систем (1), (3)–(5) задача управления асинхронным спектром с целевым множеством L разрешима тогда и только тогда, когда $L = \{0\}$ и выполняется неравенство

$$\text{rank}_{\text{col}} A^{(1)}(t) = k < n. \quad (7)$$

Д о к а з а т е л ь с т в о. Д о с т а т о ч н о с т ь. Пусть для указанного класса линейных систем выполнены условия теоремы. Программное управление, решающее задачу, будем искать в виде

$$u = U(t) = \hat{U} + \tilde{U}(t),$$

где $\tilde{U}(t)$ – осциллирующая составляющая, т. е. периодический вектор с нулевым средним значением, множество частот которого содержится в $\text{Mod}(A)$, а $\hat{U}$ – стационарная составляющая программного управления $U(t)$. Из [11] следует, что в смысле существования искомых сильно нерегулярных периодических решений $x = x(t)$ система (2) эквивалентна следующей системе, состоящей из двух подсистем:

$$\dot{x} = \hat{A}x + B\hat{U}, \quad \tilde{A}(t)x + B\tilde{U}(t) = 0. \quad (8)$$

Поэтому поставленная задача сводится к построению такой вектор-функции $U(t)$ из допустимого множества, чтобы система (8) имела сильно нерегулярное периодическое решение. В силу вещественности собственных значений матрицы $\hat{A}$ из строения первой подсистемы в (8) вытекает, что ее периодическое решение, а значит и периодическое решение всей системы (8) может быть только стационарным. Следовательно, $x = x(t) \equiv \text{const}$.

В принятых ранее обозначениях систему (8) можно записать в виде

$$\begin{pmatrix} \dot{x}' \\ \dot{x}'' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{A}_{11} & \hat{A}_{12} \\ \hat{A}_{21} & \hat{A}_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x' \\ x'' \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B_{11} \\ B_{21} \end{pmatrix} \hat{U},$$

$$\begin{pmatrix} \tilde{A}_{11}(t) & \tilde{A}_{12}(t) \\ \tilde{A}_{21}(t) & \tilde{A}_{22}(t) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x' \\ x'' \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B_{11} \\ B_{21} \end{pmatrix} \tilde{U}(t) = 0,$$

откуда в силу условия (3) получаем состоящую из четырех подсистем систему

$$\begin{aligned}\dot{x}' &= \hat{A}_{11}x' + \hat{A}_{12}x'', \quad \dot{x}'' = \hat{A}_{21}x' + \hat{A}_{22}x'' + B_{21}\hat{U}, \\ \tilde{A}_{11}(t)x' + \tilde{A}_{12}(t)x'' &= 0, \quad \tilde{A}_{21}(t)x' + \tilde{A}_{22}(t)x'' + B_{21}\tilde{U}(t) = 0.\end{aligned}$$

С учетом предположений (4), (5) о структуре усреднения $\hat{A}$ матрицы коэффициентов, последняя система примет вид

$$\begin{aligned}\dot{x}' &= \text{diag}(0, \dots, 0)x', \quad \dot{x}'' = \text{diag}(0, \dots, 0, \hat{a}_{k_{d+m+1}k_{d+m+1}}, \dots, \hat{a}_{k_n k_n})x'' + B_{21}\hat{U}, \\ \tilde{A}_{11}(t)x' + A_{12}(t)x'' &= 0, \quad A_{21}(t)x' + \tilde{A}_{22}(t)x'' + B_{21}\tilde{U}(t) = 0.\end{aligned}\quad (9)$$

Представим вектор x'' в виде

$$x'' = \text{col}(x''_{(1)}, x''_{(2)}), \quad (10)$$

где векторы $x''_{(1)}$ и $x''_{(2)}$ составлены соответственно из первых m и последних $r_1 - m$ компонент вектора x'' . Пусть также $B_{21}^{(1)}$ и $B_{21}^{(2)}$ – блоки, образованные первыми m и последними $r_1 - m$ строками матрицы B_{21} . Тогда с учетом представления (10) система (9) запишется следующим образом:

$$\begin{aligned}\dot{x}' &= 0, \quad \dot{x}''_{(1)} = \text{diag}(0, \dots, 0)x''_{(1)} + B_{21}^{(1)}\hat{U}, \\ \dot{x}''_{(2)} &= \text{diag}(\hat{a}_{k_{d+m+1}k_{d+m+1}}, \dots, \hat{a}_{k_n k_n})x''_{(2)} + B_{21}^{(2)}\hat{U}, \\ A_{11}(t)x' + A_{12}(t)x'' &= 0, \quad A_{21}(t)x' + \tilde{A}_{22}(t)x'' + B_{21}\tilde{U}(t) = 0.\end{aligned}\quad (11)$$

Используя принятые выше обозначения выпишем отдельно четвертую подсистему из системы (9)

$$A^{(1)}(t)\text{col}(x', x''_{(1)}, x''_{(2)}) = 0. \quad (12)$$

В силу оценки (7) столбцовый ранг блока $A^{(1)}(t)$, составленного из строк матрицы коэффициентов исходной системы, является неполным. Тогда согласно [6, с. 43] найдется постоянная неособенная $(n \times n)$ -матрица Q такая, что у матрицы $A_Q^{(1)}(t) = A^{(1)}(t)Q$ первые $n - k$ столбцов будут нулевыми, а остальные k столбцов будут линейно независимыми.

Систему (12) при помощи замены переменных

$$\text{col}(x', x'') = \text{col}(x', x''_{(1)}, x''_{(2)}) = Qy \quad (13)$$

приведем к системе

$$A_Q^{(1)}(t)y = 0. \quad (14)$$

Отметим, что матрица $A_Q^{(1)}(t)$ является ω -периодической. Исследуем систему (14) на предмет структуры сильно нерегулярных периодических решений $y = y(t)$. Поскольку последние k столбцов матрицы $A_Q^{(1)}(t)$ линейно независимы, то в силу [6, с. 41] соответствующие компоненты вектора $y(t)$ должны быть нулевыми

$$y(t) = \text{col}(y^{(1)}(t), 0, \dots, 0),$$

где $y^{(1)}(t) = \text{col}(\alpha_1(t), \dots, \alpha_k(t))$, $\alpha_j(t)$, $j = \overline{1, n-k}$, – некоторые произвольные периодические функции периода Ω , несоизмеримого с ω . Поскольку выше показано, что искомое сильно нерегулярное периодическое решение $x(t)$ является стационарным, то в силу неособенности преобразования (14) вектор $y = y(t)$ также будет постоянным. Значит, $\alpha_j(t) \equiv C_j$, $j = \overline{1, n-k}$, и

$$y(t) = \text{col}(C_1, \dots, C_{n-k}, 0, \dots, 0), \quad (15)$$

где C_j , $j = \overline{1, n-k}$, – некоторые произвольные вещественные постоянные.

Тогда на основании (13), (15) компоненты сильно нерегулярного периодического решения $x = x(t)$ системы (11) представимы следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{col}(x'(t), x''(t)) &= \text{col}(x'(t), x''_{(1)}(t), x''_{(2)}(t)) = \\ &= Q \text{col}(C_1, \dots, C_{n-k}, 0, \dots, 0), \end{aligned} \quad (16)$$

где константы C_j , $j = \overline{1, k}$, определены в (15).

Обозначим матрицу, составленную из первых $n-k$ столбцов матрицы Q через $Q_{n,n-k}$. Разбиение матрицы $Q_{n,n-k}$ на три вертикальных блока $Q_{n,n-k}^{(1)}$, $Q_{n,n-k}^{(2)}$, $Q_{n,n-k}^{(3)}$ размерностей соответственно $d \times (n-k)$, $m \times (n-k)$, $(n-d-m) \times (n-k)$ позволит найти из (16) векторы

$$\begin{aligned} x'(t) &= Q_{n,n-k}^{(1)} \text{col}(C_1, \dots, C_{n-k}), \\ x''_{(1)}(t) &= Q_{n,n-k}^{(2)} \text{col}(C_1, \dots, C_{n-k}), \quad x''_{(2)}(t) = Q_{n,n-k}^{(3)} \text{col}(C_1, \dots, C_{n-k}). \end{aligned} \quad (17)$$

В силу построения все векторы (17) удовлетворяют четвертой подсистеме из (11). Несложно убедиться в том, что вектор $x'(t)$, в частности, удовлетворяет без дополнительных ограничений первой подсистеме из (11). Вектор же $x''_{(1)}(t)$ является решением второй подсистемы из (11) только при выполнении условия

$$B_{21}^{(1)} \hat{U} = 0. \quad (18)$$

В свою очередь вектор $x''_{(2)}(t)$ удовлетворяет третьей подсистеме из (11), если имеет место равенство

$$\text{diag}(\hat{a}_{k_{d+m+1}k_{d+m+1}}, \dots, \hat{a}_{k_n k_n}) Q_{n,n-k}^{(2)} \text{col}(C_1, \dots, C_{n-k}) + B_{21}^{(2)} \hat{U} = 0. \quad (19)$$

Значит, вектор (17) будет решением первых четырех подсистем системы (11) при выполнении условий (18) и (19), которые представляют собой линейные алгебраические системы m и $n-d-m$ уравнений соответственно относительно неизвестного вектора $\hat{U}$. Объединим эти условия следующим образом:

$$B_{21} \hat{U} = \text{col}(0, \dots, 0, \text{diag}(\hat{a}_{k_{d+m+1}k_{d+m+1}}, \dots, \hat{a}_{k_n k_n}) Q_{n,n-k}^{(2)} \text{col}(C_1, \dots, C_{n-k})) = H(C_1, \dots, C_{n-k}). \quad (20)$$

Рассмотрим линейную неоднородную алгебраическую систему

$$B_{21} z = H(C_1, \dots, C_{n-k}) \quad (21)$$

относительно неизвестного постоянного вектора z . В силу (6) ранг матрицы B_{21} равен числу ее строк, которое меньше числа столбцов. Поэтому ранги основной и расширенной матриц системы (21) совпадают, что свидетельствует о разрешимости этой системы. Пусть

$$z = z(C_1, \dots, C_{n-k}) \quad (22)$$

– некоторое решение системы (21), где $z(C_1, \dots, C_{n-k})$ – линейная форма постоянных $C_1, \dots, C_{n-k}$. Тогда вектор

$$\hat{U} = z(C_1, \dots, C_{n-k}) \quad (23)$$

будет решением системы (20). Иначе говоря, выбор стационарной составляющей управления в виде (22), (23) обеспечивает выполнение условий (18), (19). Следовательно, вектор (17) будет решением первых четырех подсистем системы (11).

Наконец, осталось выяснить, когда вектор (17) будет удовлетворять последней подсистеме из (11). Для этого составим вспомогательную систему относительно неизвестной ω -периодической вектор-функции $\tilde{U}(t)$ с нулевым средним

$$B_{21}\tilde{U}(t) = -A_{21}(t)Q_{n,n-k}^{(1)}\text{col}(C_1, \dots, C_{n-k}) - \\ -\tilde{A}_{22}(t)\text{col}(Q_{n,n-k}^{(2)}\text{col}(C_1, \dots, C_{n-k}), Q_{n,n-k}^{(3)}\text{col}(C_1, \dots, C_{n-k})) = F(t, C_1, \dots, C_{n-k}), \quad (24)$$

где вектор-функция $F(t, C_1, \dots, C_{n-k})$ будет ω -периодической по t и имеет нулевое среднее значение в силу свойств матриц $A_{21}(t)$, $\tilde{A}_{22}(t)$. Пусть $E_{r_1 r_1}$ – единичная $(r_1 \times r_1)$ -матрица. Так как ранг матрицы B_{21} равен числу ее строк, то матричное уравнение

$$B_{21}V + E_{r_1 r_1} = 0$$

разрешимо относительно постоянной $(r \times r_1)$ -матрицы V . Возьмем какое-либо его решение $V = V_E$. Непосредственной проверкой можно убедиться в том, что вектор

$$\tilde{U}(t) = V_E F(t, C_1, \dots, C_{n-k}) \quad (25)$$

ω -периодический по t , имеет нулевое среднее значение и удовлетворяет системе (24). Другими словами, выбор осциллирующей составляющей управления в виде (25) обеспечивает выполнение условия (24). При этом несложно убедиться, что при подстановке в пятую подсистему из (11) векторов (17), (24) получим верное тождество. Следовательно, вектор (17) будет решением и последней подсистемы системы (11).

В итоге построено управление (23), (25) такое, что система (11) будет иметь решение (17), записав которое в виде

$$x(t) = \text{ord}_{\text{row}}(\text{col}(x'(t), x''(t))), \quad (26)$$

получим искомое решение системы (8). Как отмечено выше, вектор, определяемый равенством (26), будет удовлетворять также и системе (2).

Н е о б х о д и м о с т ь. Предположим, что построено управление $U(t)$ из допустимого множества такое, что система (2) имеет нетривиальное периодическое решение $x = x(t)$ с частотным спектром L . Из [11] следует, что вектор $x(t)$ удовлетворяет тождеству

$$-\dot{x}(t) + \hat{A}x(t) + B\hat{U} \equiv 0,$$

т. е. является решением линейной дифференциальной системы с постоянными матрицей коэффициентов $\hat{A}$ и постоянной неоднородной частью $B\hat{U}$. Отсюда, в силу условия (4) на матрицу $\hat{A}$ вытекает, что $x(t) \equiv \text{const}$. Следовательно, $L = \{0\}$.

Кроме этого должно выполняться тождество

$$\tilde{A}(t)x(t) \equiv 0,$$

из которого для компонент $x'(t) = \text{col}(x_{k_1}(t), \dots, x_{k_d}(t))$, $x''(t) = \text{col}(x_{k_{d+1}}(t), \dots, x_{k_n}(t))$ вектора $x(t)$ в силу предположений (3), (4) получаем тождество

$$A_{11}(t)x'(t) + A_{12}(t)x''(t) = A^{(1)}(t)\text{col}(x'(t), x''(t)) \equiv 0.$$

Так как пересечение частотных модулей матрицы $A(t)$ и решения $x(t)$ тривиально, то таким же будет и пересечение частотных модулей ее блока $A^{(1)}(t)$ и вектора $\text{col}(x'(t), x''(t))$, $\text{ord}_{\text{row}}(\text{col}(x'(t), x''(t))) = x(t)$. Поэтому из последнего тождества согласно [6, с. 41] следует, что матрица $A^{(1)}(t)$ имеет неполный столбцовый ранг, т. е. выполняется оценка (7).

Теорема доказана.

Благодарности. Работа выполнена в Институте математики НАН Беларуси в рамках ГПФИ «Конвергенция–2025» (подпрограмма «Математические модели и методы»).

Acknowledgements. The work was carried out at the Institute of Mathematics of the National Academy of Sciences of Belarus within the framework of the SPFI “Convergence–2025” (subprogram “Mathematical Models and Methods”).

Список использованных источников

1. Zubov, V. I. *Lectures on Control Theory* / В. И. Зубов. – М., 1975. – 495 с.
2. Макаров, Е. К. Управляемость асимптотических инвариантов нестационарных линейных систем / Е. К. Макаров, С. Н. Попова. – Минск, 2012. – 407 с.
3. Massera, J. L. Observaciones sobre las soluciones periodicas de ecuaciones diferenciales / J. L. Massera // *Boletin de la Facultad de Ingenieria*. – 1950. – Vol. 4, N 1. – P. 37–45.
4. Курцвейль, Я. О периодических и почти периодических решениях систем обыкновенных дифференциальных уравнений / Я. Курцвейль, О. Вейвода // *Чехословацкий математический журнал*. – 1955. – Т. 5, № 3. – С. 362–370.
5. Деменчук, А. К. Задача управления спектром сильно нерегулярных периодических колебаний / А. К. Деменчук // *Доклады Национальной академии наук Беларуси*. – 2009. – Т. 53, № 4. – С. 37–42.
6. Деменчук, А. К. Асинхронные колебания в дифференциальных системах. Условия существования и управления / А. К. Деменчук. – Saarbrücken, 2012. – 186 с.
7. Деменчук, А. К. Управление асинхронным спектром линейных систем с нулевым средним значением матрицы коэффициентов / А. К. Деменчук // *Труды Института математики*. – 2018. – Т. 26, № 1. – С. 31–34.
8. Деменчук, А. К. Управление асинхронным спектром линейных систем с невырожденным средним значением матрицы коэффициентов / А. К. Деменчук // *Труды Института математики*. – 2020. – Т. 28, № 1–2. – С. 11–16.
9. Деменчук, А. К. Управление асинхронным спектром линейных систем с матрицей при управлении максимального ранга / А. К. Деменчук // *Труды Института математики*. – 2019. – Т. 27, № 1–2. – С. 23–28.
10. Деменчук, А. К. Управление асинхронным спектром линейных систем с невырожденным диагональным блоком усреднения матрицы коэффициентов / А. К. Деменчук // *Труды Института математики*. – 2022. – Т. 30, № 1–2. – С. 22–29.
11. Грудю, Э. И. О периодических решениях с несоизмеримыми периодами линейных неоднородных периодических дифференциальных систем / Э. И. Грудю, А. К. Деменчук // *Дифференциальные уравнения*. – 1987. – Т. 23, № 3. – С. 409–416.

References

1. Zubov V. I. *Lectures on Control Theory*. Moscow, 1975. 495 p. (in Russian).
2. Makarov E. K., Popova S. N. *Controllability of Asymptotic Invariants of Nonstationary Linear Systems*. Minsk, 2012. 407 p. (in Russian).
3. Massera J. L. Observaciones sobre las soluciones periodicas de ecuaciones diferenciales. *Boletin de la Facultad de Ingenieria*, 1950, vol. 4, no. 1, pp. 37–45.
4. Kurzweil J., Vejvoda O. On the periodic and almost periodic solutions of a system of ordinary differential equations. *Chechoslovatskii matematicheskii zhurnal = Czechoslovak Mathematical Journal*, 1955, vol. 5, no. 3, pp. 362–370 (in Russian).
5. Demenchuk A. K. The control problem of the spectrum of strongly irregular periodic oscillations. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2009, vol. 53, no. 4, pp. 37–42 (in Russian).
6. Demenchuk A. *Asynchronous Oscillations in Differential Systems. Conditions of Existence and Control*. Saarbrücken, 2012. 186 p. (in Russian).
7. Demenchuk A. K. Control of the asynchronous spectrum of linear systems with zero mean value of the matrix of coefficients. *Trudy Instituta Matematiki = Proceedings of the Institute of Mathematics*, 2018, vol. 26, no. 1, pp. 31–34 (in Russian).
8. Demenchuk A. K. Control of the asynchronous spectrum of linear systems with a non-degenerate mean value of the matrix of coefficients. *Trudy Instituta Matematiki = Proceedings of the Institute of Mathematics*, 2020, vol. 28, no. 1–2, pp. 11–16 (in Russian).
9. Demenchuk A. K. Asynchronous spectrum control of linear systems with a matrix under maximum rank control. *Trudy Instituta Matematiki = Proceedings of the Institute of Mathematics*, 2019, vol. 27, no. 1–2, pp. 23–28 (in Russian).

10. Demenchuk A. K. Control of the asynchronous spectrum of linear systems with a non-degenerate diagonal averaging block of the matrix of coefficients. *Trudy Instituta Matematiki = Proceedings of the Institute of Mathematics*, 2022, vol. 30, no. 1–2, pp. 22–29 (in Russian).

11. Grudo E. I., Demenchuk A. K. On periodic solutions with incommensurable periods of linear nonhomogeneous periodic differential systems. *Differential Equations*, 1987, vol. 23, no. 3, pp. 409–416 (in Russian).

Информация об авторе

Деменчук Александр Константинович – д-р физ.-мат. наук, профессор, гл. науч. сотрудник. Институт математики НАН Беларуси (ул. Сурганова, 11, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: demenchuk@im.bas-net.by.

Information about the author

Demenchuk Aleksandr K. – D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Chief Researcher. Institute of Mathematics of the National Academy of Science of Belarus (11, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: demenchuk@im.bas-net.by.

ФИЗИКА

PHYSICS

UDC 537.6

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2025-69-3-192-197>

Received 06.02.2025

Поступило в редакцию 06.02.2025

Roman A. Lanovsky, Olga S. Mantytskaya, Nina V. Tereshko, Maxim V. Bushinsky,
Aleksandra N. Chobot, Aleksandr V. Nikitin, Oleg V. Ignatenko

*Scientific-Practical Materials Research Centre of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Republic of Belarus*

MAGNETIC PROPERTIES OF HIGH-PRESSURE SYNTHESIZED

 $\text{Sr}_{0.8}\text{Eu}_{0.2}\text{Co}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}_{3-d}$ ($x = 0; 0.05$) COBALTITES

(Communicated by Corresponding Member Valery M. Fedosyuk)

Abstract. The present study investigates the impact of high-pressure synthesis on the magnetic properties of 314-related $\text{Sr}_{0.8}\text{Eu}_{0.2}\text{Co}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}_{3-d}$ ($x = 0; 0.05$) cobaltites. The observed magnetic behavior is driven by an increase in oxygen content, leading to the formation of a significant number of Co^{4+} ions. This results in enhanced ferromagnetic interactions through $\text{Co}^{4+}-\text{O}-\text{Co}^{3+}$ exchange and/or the emergence of superparamagnetic clusters below T_C , attributed to electron transfer between IS Co^{3+} and LS Co^{4+} . These findings highlight the role of oxygen stoichiometry in tuning the magnetic properties of perovskite-related cobaltites.

Keywords: cobaltites, high-pressure synthesis, crystal structure, magnetic properties

For citation. Lanovsky R. A., Mantytskaya O. S., Tereshko N. V., Bushinsky M. V., Chobot A. N., Nikitin A. V., Ignatenko O. V. Magnetic properties of high-pressure synthesized $\text{Sr}_{0.8}\text{Eu}_{0.2}\text{Co}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}_{3-d}$ ($x = 0; 0.05$) cobaltites. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2025, vol. 69, no. 3, pp. 192–197. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2025-69-3-192-197>

Р. А. Лановский, О. С. Мантыцкая, Н. В. Терешко, М. В. Бушинский, А. Н. Чобот,
А. В. Никитин, О. В. Игнатенко

*Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению,
Минск, Республика Беларусь*

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА СИНТЕЗИРОВАННЫХ
ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ КОБАЛЬТИТОВ $\text{Sr}_{0.8}\text{Eu}_{0.2}\text{Co}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}_{3-d}$ ($x = 0; 0.05$)

(Представлено членом-корреспондентом В. М. Федосюком)

Аннотация. Исследовано влияние синтеза под высоким давлением на магнитные свойства семейства 314 кобальтитов $\text{Sr}_{0.8}\text{Eu}_{0.2}\text{Co}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}_{3-d}$ ($x = 0; 0.05$). Наблюдаемое магнитное поведение обусловлено увеличением содержания кислорода, что приводит к образованию значительного количества ионов Co^{4+} . Как следствие, происходит усиление ферромагнитного состояния из-за возникновения сверхобменных взаимодействий $\text{Co}^{4+}-\text{O}-\text{Co}^{3+}$ и/или появление суперпарамагнитных кластеров ниже T_C , связанных с переносом электронов между IS Co^{3+} и LS Co^{4+} . Полученные результаты подчеркивают роль стехиометрии кислорода в формировании магнитных свойств перовскитоподобных кобальтитов.

Ключевые слова: кобальтиты, синтез под высоким давлением, кристаллическая структура, магнитные свойства

Для цитирования. Магнитные свойства синтезированных под высоким давлением кобальтитов $\text{Sr}_{0.8}\text{Eu}_{0.2}\text{Co}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}_{3-d}$ ($x = 0; 0.05$) / Р. А. Лановский, О. С. Мантыцкая, Н. В. Терешко [и др.] // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2025. – Т. 69, № 3. – С. 192–197. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2025-69-3-192-197>

Introduction. Layered cobaltites of the 314-cobaltite family (314 refers to the composition $\text{Sr}_3\text{LnCo}_4\text{O}_{10.5-d}$, where Ln represents a lanthanide) are an interesting class of materials that have been actively studied in recent years [1–5]. These materials exhibit G-type antiferromagnetic ordering with a small ferromagnetic component and a magnetic ordering temperature above room temperature. The ideal structure of layered 314 cobaltites contains a significant number of oxygen vacancies. It is well known that variations in oxygen content can dramatically affect physical properties of cobaltites.

It was shown that $\text{SrCoO}_{3-\gamma}$ can exhibit various structural distortions depending on the synthesis conditions and, consequently, on oxygen content: at $\gamma = 0.5$ it adopts an orthorhombic structure; at $\gamma = 0.15$ a tetragonal structure; and in the nearly stoichiometric case, a cubic structure with space group $\text{Pm}\bar{3}\text{m}$ [6].

In this paper, we report a study of the magnetic properties of a $\text{Sr}_{0.8}\text{Eu}_{0.2}\text{Co}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}_{3-d}$ ($x = 0; 0.05$) cobaltites, which are related to the 314-cobaltite family. The samples were obtained using different synthesis methods, resulting in varying oxygen contents.

Materials and methods of research. Samples preparation. Polycrystalline samples of solid solutions $\text{Sr}_{0.8}\text{Eu}_{0.2}\text{Co}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}_{3-d}$ ($x = 0; 0.05$) were synthesized using two different methods: conventional solid-state reaction in air conditions and high-pressure synthesis. The initial reagents of high purity Eu_2O_3 , SrCO_3 , Co_3O_4 and ZnO were taken in stoichiometric proportions and thoroughly mixed in a planetary ball mill RETSCH for 30 minutes at a speed of 250 rpm. To remove moisture, Eu_2O_3 was pre-annealed at 1000 °C for 2 hours before weighing.

A preliminary synthesis was carried out for 21–22 hours at a temperature of 1000 °C. The resulting material was then ground into a fine powder, which served as the precursor for the final synthesis.

For the conventional solid-state reaction method, the final synthesis was carried out at a temperature of 1150 °C for 8 hours with cooling for at least 10 hours down to a room temperature.

The second batch of the samples was synthesized under high-pressure conditions. Grounded powder of pre-synthesized sample was packed into catlinite form with a graphite heater. A pre-sintering step allows to avoid the decomposition of strontium carbonate, which would otherwise release gas in a closed volume during high-pressure synthesis. The sample was shielded from the graphite heated by molybdenum screen to prevent unwanted reaction of the oxygen-containing sample with the graphite heater. The synthesis was carried out at 1150–1250 °C under a pressure of 4.5 GPa for 3 minutes.

Instrumental details. Room temperature phase analysis of the samples was performed by X-ray powder diffraction (XRD) using an X-ray diffractometer DRON-3M (CuK-radiation) with a scanning step of 0.03° and an exposure time of 5 seconds. The data were refined using the Rietveld method [7] and the FullProf program [8]. As a basic function to describe the shape of the peaks, the Thompson–Cox–Hastings pseudo-Voigt function was chosen [9]. Due to the difficulty of detecting parameters associated with light elements such as oxygen using a conventional X-ray diffractometer, the oxygen Debye–Waller factor values were fixed during the refinement. The oxygen content was taken in accordance with the iodometry data, and the priority of filling certain oxygen positions was brought into line with the neutron diffraction data of the previously investigated Y-314 cobaltites [4].

Magnetic measurements were performed on a universal measuring device for physical properties (Cryogenic Ltd.) in magnetic fields up to 14 T and in the temperature range of 5 to 315 K.

Iodometry. Oxygen content was determined via iodometric titration. For each sample, 20–60 mg of powder was dissolved in dilute hydrochloric acid containing KI (always kept above metallic Zn and never deposit into air). Then the released iodine was titrated with $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$. The titration end-point was detected using starch-indicator. Each sample of solid solutions was titrated up to 5 times to achieve high accuracy of oxygen index determination and to eliminate possible errors at one of the titration stages. In addition, a blank titration (without a sample) was carried out to ensure that atmospheric oxygen does not affect the results.

Results and discussion. Samples characterization. Based on the XRD data, it was found that all samples, whether synthesized conventionally or under high pressure, can be described using the tetragonal I4/mmm space group with $2a_p \times 2a_p \times 4a_p$ super cell with alternating layers of CoO_6 and $\text{CoO}_{4+\delta}$. The refined crystal structure includes three types of Sr/Eu atoms at Wyckoff sites 4e (0, 0, z) and 8g (0, 0.5, z), two types of Co atoms placed at 8h (x, x, 0) and 8f (0.25, 0.75, 0.25), and four different oxygen

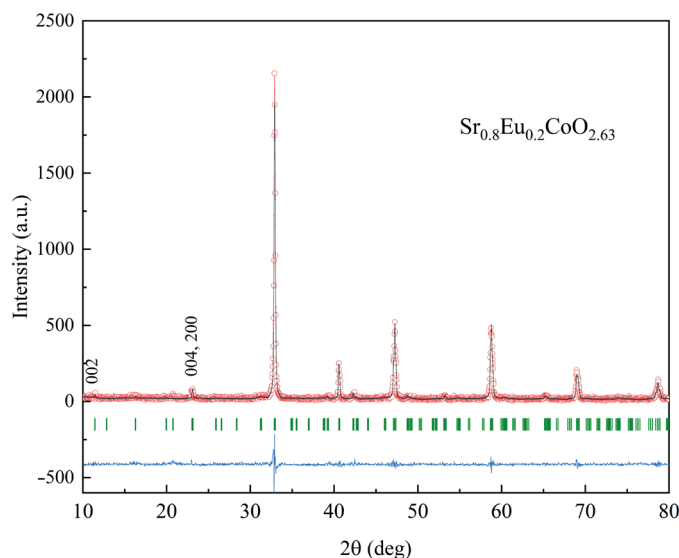


Fig. 1. Observed (circles), calculated (line) and difference patterns of XRD data of $\text{Sr}_{0.8}\text{Eu}_{0.2}\text{CoO}_{2.63}$ at room temperature in model with space group $I4/mmm\ 2a_p \times 2a_p \times 4a_p$ super cell, conventional synthesis. The vertical bars indicate the calculated position of the nuclear Bragg peaks

Crystal structural parameters of $\text{Sr}_{0.8}\text{Eu}_{0.2}\text{Co}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}_{3-d}$ ($x = 0; 0.05$) solid solutions in model with space group $I4/mmm\ (2a_p \times 2a_p \times 4a_p)$ determined from the XRD data refinement, $T = 300$ K. High-pressure synthesized samples are marked with ‘HP’

Sample	$\text{Sr}_{0.8}\text{Eu}_{0.2}\text{CoO}_{2.63}$	HP- $\text{Sr}_{0.8}\text{Eu}_{0.2}\text{CoO}_{2.83}$	$\text{Sr}_{0.8}\text{Eu}_{0.2}\text{Co}_{0.95}\text{Zn}_{0.05}\text{O}_{2.62}$	HP- $\text{Sr}_{0.8}\text{Eu}_{0.2}\text{Co}_{0.95}\text{Zn}_{0.05}\text{O}_{2.91}$
a, b (Å)	7.680 (27)	7.677 (49)	7.679 (45)	7.657 (34)
c (Å)	15.410 (20)	15.443 (19)	15.433 (88)	15.417 (98)
V (Å ³)	908.9 (94)	910.2 (82)	910.1 (96)	904.0 (32)
χ^2	1.56	1.73	1.71	1.68

positions, O1 16n (0, y , z), O2 16m (x , x , z), O3 8i (0, y , 0), and O4 8j (x , 0.5, 0). Figure 1 shows a result of processing the X-ray diffraction spectra of $\text{Sr}_{0.8}\text{Eu}_{0.2}\text{CoO}_{2.63}$ synthesized by conventional solid state technique. The main crystal structural parameters of $\text{Sr}_{0.8}\text{Eu}_{0.2}\text{Co}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}_{3-d}$ ($x = 0; 0.05$) are summarized in Table.

It should be noted that for other 314-family cobaltites, the true symmetry has been identified as monoclinic $A2/m$ [2; 4]. However, the resolving power of a conventional laboratory diffractometer is insufficient to resolve these subtle differences. Nevertheless, a number of authors have successfully described similar 314 cobaltites using the tetragonal $I4/mmm$ space group with sufficient accuracy [1; 3–5; 10].

According to iodometry, the oxygen content significantly increased in samples synthesized under high pressure compared to those synthesized conventionally. This can be attributed to the higher oxygen content in the resulting precursor after the pre-synthesis stage. During subsequent synthesis under high pressure, the excess oxygen remains trapped in the closed high-pressure environment, leading to overoxidized samples.

Magnetometry. Figure 2 shows temperature dependences of magnetization obtained on heating after cooling without a field (ZFC) and in a field of 0.02 T (FC). Panels (a) and (b) correspond to conventionally synthesized samples, while (c) and (d) represent high-pressure synthesized samples. The isothermal magnetization curves at $T = 5$ K in a field up to 14 T are shown in Figure 3.

$\text{Sr}_{0.8}\text{Eu}_{0.2}\text{CoO}_{2.63}$ and $\text{Sr}_{0.8}\text{Eu}_{0.2}\text{Co}_{0.95}\text{Zn}_{0.05}\text{O}_{2.62}$ exhibit magnetic ordering temperature higher than room temperature, typical for 314-cobaltites. A second inflection point is observed in the FC and ZFC curves at approximately 150 and 120 K, respectively (see figure 2, a, b). As clearly can be seen, high-pressure synthesized samples show significantly larger magnetization values (see figure 2, c, d).

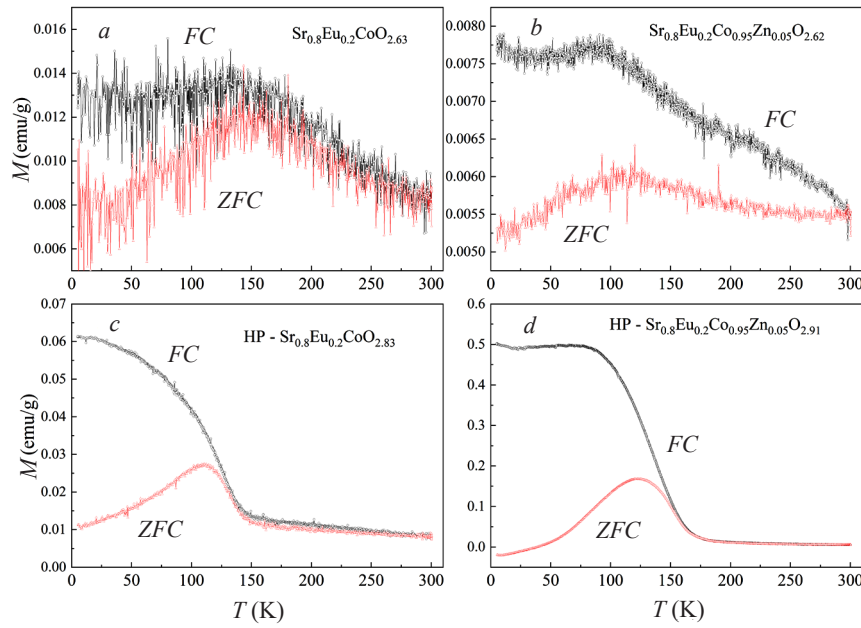


Fig. 2. Temperature dependences of the magnetization of the $\text{Sr}_{0.8}\text{Eu}_{0.2}\text{Co}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}_{3-d}$ ($x = 0, 0.05$, field cooling (FC) and zero field cooling (ZFC), measured at 0.02 T field). High-pressure synthesized samples are marked with ‘HP’

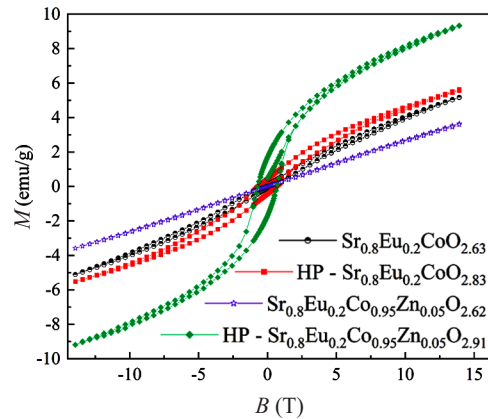


Fig. 3. Isothermal dependences of the magnetization of the $\text{Sr}_{0.8}\text{Eu}_{0.2}\text{Co}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}_{3-d}$ ($x = 0, 0.05$), $T = 5$ K. High-pressure synthesized samples are marked with ‘HP’

The coercive force of $\text{Sr}_{0.8}\text{Eu}_{0.2}\text{CoO}_{2.63}$ is 0.21 T with a remanent magnetization of 0.12 emu/g at 5 K (see figure 3). With substitution of Co ions with Zn ions both coercive force and remanent magnetization drops, resulting in an almost linear field dependence for $\text{Sr}_{0.8}\text{Eu}_{0.2}\text{Co}_{0.95}\text{Zn}_{0.05}\text{O}_{2.62}$ and almost order of magnitude smaller magnetization values at temperature dependences of magnetization.

For high-pressure synthesized (are marked with HP) samples, HP- $\text{Sr}_{0.8}\text{Eu}_{0.2}\text{CoO}_{2.83}$ exhibits a coercive force of 0.69 T and a remanent magnetization of 0.44 emu/g at 5 K. Zn substitution in HP- $\text{Sr}_{0.8}\text{Eu}_{0.2}\text{Co}_{0.95}\text{Zn}_{0.05}\text{O}_{2.91}$ results in a similar coercive force of 0.70 T but much larger remanent magnetization of 1.71 emu/g.

These drastic changes of magnetic properties can be attributed to an increase in oxygen content with switching from conventional synthesis to high-pressure synthesis. Formal oxidation state of Co ions of $\text{Sr}_{0.8}\text{Eu}_{0.2}\text{CoO}_{2.63}$ is 1.06, corresponding to nearly exclusively Co^{3+} . For HP- $\text{Sr}_{0.8}\text{Eu}_{0.2}\text{CoO}_{2.83}$ the formal oxidation state is 1.46, denoting nearly 50/50 Co^{3+} to Co^{4+} ratio. For Zn-substituted $\text{Sr}_{0.8}\text{Eu}_{0.2}\text{Co}_{0.95}\text{Zn}_{0.05}\text{O}_{2.62}$ and HP- $\text{Sr}_{0.8}\text{Eu}_{0.2}\text{Co}_{0.95}\text{Zn}_{0.05}\text{O}_{2.91}$ the oxidation state is 1.116 and 1.705, respectively.

The 314-like cobaltites are G-type antiferromagnets with a small high-temperature ferromagnetic component, originating from the competition between positive and negative exchange interactions in anion-deficient layers, leading to the stabilization of canted magnetic structure [4].

The appearance of Co^{4+} ions, along with a decrease in oxygen vacancy concentration, favors positive $\text{Co}^{4+}\text{--O--Co}^{3+}$ exchange interactions, resulting in the observed changes in magnetic properties. Another possible explanation is based on the theory proposed by Goodenough, Zhou, and Yamaguchi et al. [11; 12] for the $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CoO}_3$ system. They suggested that the strong covalent bonding of the Co^{4+}O_6 LS complex stabilizes IS Co^{3+} at the nearest-neighbor cobalt, and ferromagnetic electron transfer from IS Co^{3+} to LS Co^{4+} gives rise to superparamagnetic clusters. The superparamagnetic clusters interact throw the Co^{3+} matrix to form a spin glass and with long-range ferromagnetic ordering below T_C .

Both of these scenarios are possible due to the formation of a large number of tetravalent cobalt ions as a result of sample overoxidation. This overoxidation leads to the dominance of above discussed mechanisms rather than the small ferromagnetic component associated with the canted non-collinear structure.

Conclusions. Our study shows that high-pressure synthesis results in pronounced changes in the magnetic properties of the 314-related $\text{Sr}_{0.8}\text{Eu}_{0.2}\text{Co}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}_{3-d}$ ($x = 0; 0.05$) cobaltites. These magnetic property changes can be attributed to an increase in oxygen content, which promotes the formation of a large number of Co^{4+} ions. The mechanism underlying the occurrence of a “more ferromagnetic” state may involve both the straightforward formation of positive $\text{Co}^{4+}\text{--O--Co}^{3+}$ exchange interactions and/or the formation of superparamagnetic clusters below T_C , due to the ferromagnetic electron transfer from IS Co^{3+} to LS Co^{4+} .

Acknowledgements. The authors would like to acknowledge the financial support from the agreement with the BRFFR (project Ф23М-017 and project Ф23-108).

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ (проект Ф23М-017 и проект Ф23-108).

References

1. James M., Cassidy D., Wilson K. F., Horvat J., Withers R. L. Oxygen vacancy ordering and magnetism in the rare earth stabilized perovskite form of $\text{SrCoO}_{3-\delta}$. *Solid State Sciences*, 2004, vol. 6, no. 7, pp. 655–662. <https://doi.org/10.1016/j.solid-state-sciences.2003.03.001>
2. Ishiwata S., Kobayashi W., Terasaki I., Kato K., Takata M. Structure-property relationship in the ordered-perovskite-related oxide $\text{Sr}_{3.12}\text{Eu}_{0.88}\text{Co}_4\text{O}_{10.5}$. *Physical Review B*, 2007, vol. 75, art. 220406. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.75.220406>
3. Istomin S. Ya., Grins J., Svensson G., Drozhzhin O. A., Kozhevnikov V. L., Antipov E. V., Attfield J. P. Crystal structure of the novel complex cobalt oxide $\text{Sr}_{0.7}\text{Y}_{0.3}\text{CoO}_{2.62}$. *Chemistry of Materials*, 2003, vol. 15, no. 21, pp. 4012–4020. <https://doi.org/10.1021/cm034263e>
4. Lanovsky R., Tereshko N., Mantyskaya O., Fedotova V., Kozlenko D., Ritter C., Bushinsky M. The structure, magnetic and magnetotransport properties of $\text{Sr}_{1-x}\text{YCoO}_{3-\delta}$ layered cobaltites. *Physica Status Solidi B*, 2022, vol. 259, no. 8, art. 2100636. <https://doi.org/10.1002/pssb.202100636>
5. Sheptyakov D., Pomjakushin V. Yu., Drozhzhin O. A., Istomin S. Ya., Antipov E. V., Bobrikov I. A., Balagurov A. M. Correlation of chemical coordination and magnetic ordering in $\text{Sr}_3\text{YCo}_4\text{O}_{10.5+\delta}$ ($\delta = 0.02$ and 0.26). *Physical Review B*, 2009, vol. 80, art. 024409. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.80.024409>
6. Long Y., Kaneko Y., Ishiwata S., Taguchi Y., Tokura Y. Synthesis of cubic SrCoO_3 single crystal and its anisotropic magnetic and transport properties. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2011, vol. 23, art. 245601. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/24/24/245601>
7. Rietveld H. M. A profile refinement method for nuclear and magnetic structures. *Journal of Applied Crystallography*, 1969, vol. 2, pp. 65–71. <https://doi.org/10.1107/S0021889869006558>
8. Rodriguez-Carvajal J. Recent advances in magnetic structure determination by neutron powder diffraction. *Physica B: Condensed Matter*, 1993, vol. 192, no. 1–2, pp. 55–69. [https://doi.org/10.1016/0921-4526\(93\)90108-I](https://doi.org/10.1016/0921-4526(93)90108-I)
9. Finger L. W., Cox D. E., Jephcoat A. P. A correction for powder diffraction peak asymmetry due to axial divergence. *Journal of Applied Crystallography*, 1994, vol. 27, no. 6, pp. 892–900. <https://doi.org/10.1107/S0021889894004218>
10. Li Y., Kim Y. N., Cheng J., Alonso J. A., Hu Z., Chin Y.-Y., Takami T., Fernandez-Diaz M. T., Lin H.-J., Chen C.-T., Tjeng L. Y., Manthiram A., Goodenough J. B. Oxygen-deficient perovskite $\text{Sr}_{0.7}\text{Y}_{0.3}\text{CoO}_{2.65-\delta}$ as a cathode for intermediate-temperature solid oxide fuel cells. *Chemistry of Materials*, 2011, vol. 23, no. 22, pp. 5037–5044. <https://doi.org/10.1021/cm202542q>
11. Yamaguchi S., Okimoto Y., Tokura Y. Local lattice distortion during the spin-state transition in LaCoO_3 . *Physical Review B*, 1997, vol. 55, no. 14, art. 8666. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.55.R8666>
12. Cooper S. L., Egami T., Goodenough J. B., Zhou J.-S. *Localized to itinerant electronic transition in perovskite oxides*. New York, Springer, 2003, vol. 98.

Information about the authors

Lanovsky Roman A. – Ph. D. (Physics and Mathematics), Senior Researcher. Scientific and Practical Materials Research Centre of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: rommelfiz1@gmail.com.

Mantytskaya Olga S. – Ph. D. (Physics and Mathematics), Senior Researcher. Scientific and Practical Materials Research Centre of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: mantytskaja@physics.by.

Tereshko Nina V. – Ph. D. (Physics and Mathematics), Senior Researcher. Scientific and Practical Materials Research Centre of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: tereshko@physics.by.

Bushinsky Maxim V. – Ph. D. (Physics and Mathematics), Leading Researcher. Scientific and Practical Materials Research Centre of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: bushinsky@physics.by.

Chobot Aleksandra N. – Ph. D. (Physics and Mathematics), Senior Researcher. Scientific and Practical Materials Research Centre of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: a.n.chobot@tut.by.

Nikitin Aleksandr V. – Junior Researcher. Scientific and Practical Materials Research Centre of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: shyrik_n@physics.by.

Ignatenko Oleg Vladimirovich – Ph. D. (Physics and Mathematics), Head of the Laboratory. Scientific and Practical Materials Research Centre of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ignatenko@physics.by.

Информация об авторах

Лановский Роман Андреевич – канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник. Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: rommelfiz1@gmail.com.

Мантыцкая Ольга Станиславовна – канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник. Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: mantytskaja@physics.by.

Терешко Нина Викторовна – канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник. Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: tereshko@physics.by.

Бушинский Максим Владиславович – канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник. Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: bushinsky@physics.by.

Чобот Александра Николаевна – канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник. Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: a.n.chobot@tut.by.

Никитин Александр Витальевич – мл. науч. сотрудник. Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: shyrik_n@physics.by.

Игнатенко Олег Владимирович – канд. физ.-мат. наук, заведующий лабораторией. Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: ignatenko@physics.by.

ХИМИЯ CHEMISTRY

УДК 547.962.9:553.641

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2025-69-3-198-205>

Поступило в редакцию 26.11.2024

Received 26.11.2024

А. А. Гайдаш¹, академик А. И. Кулак¹, В. К. Крутько¹, О. Н. Мусская¹,
К. В. Скороцкая², Е. Н. Крутько¹

¹Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь

²Научно-исследовательский институт физико-химических проблем
Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь

СТРУКТУРИРОВАНИЕ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ МИНЕРАЛИЗАЦИИ КОЛЛАГЕНОВЫХ СКАФФОЛДОВ

Аннотация. Изучены структура и физико-химические свойства скаффолдов, полученных из ацетатных экстрактов фибриллярного коллагена из оболочек сухожилий крыс Вистар. При 37 °С синтезирован пленчатый, 6 °С – объемный скаффолды, которые структурируются на клубковые и внеклубковые фракции. Объемные соотношения фракций определяются влиянием температуры на кинкинг коллагеновых волокон: при 37 °С кинкинг подавляется и приоритетно формируется фракция с исходно расправленными волокнами – внеклубковый каркас пленчатого скаффолда, при 6 °С кинкинг усиливается и ускоряется рост фракции с исходно извитыми волокнами – клубки объемного скаффолда. Типогенез гидроксиапатита определяется микроструктурой скаффолдов и направлением развития транспирирующих структур: стехиометрический гидроксиапатит синтезируется в доминантных водоиспаряющих фракциях, карбонат-гидроксиапатит – в субдоминантных водоудерживающих фракциях. Кинкинг и прочность пептидных цепей фибриллярного коллагена обратно взаимосвязаны: при ослаблении кинкинга пептидные цепи упрочняются, при усилении – разупрочняются. Карбонатные замещения чувствительны к температуре синтеза скаффолдов: при 37 °С анионы CO_3^{2-} замещают OH^- , а при 6 °С – PO_4^{3-} группы. Понимание механизмов структурирования кальцийфосфатов на матрицах фибриллярного коллагена позволит проектировать коллаген-апатитовые скаффолды с заданными функциональными свойствами.

Ключевые слова: скаффолды, апатитогенез, стехиометрический гидроксиапатит, карбонат-гидроксиапатит, фибриллярный коллаген, минерализация *in situ*

Для цитирования. Структурирование и физико-химические аспекты минерализации коллагеновых скаффолдов / А. А. Гайдаш, А. И. Кулак, В. К. Крутько [и др.] // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2025. – Т. 69, № 3. – С. 198–205. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2025-69-3-198-205>

Alexander A. Gaidash¹, Academician Anatoly I. Kulak¹, Valentina K. Krut'ko¹, Olga N. Musskaya¹,
Katarina V. Skrotskaya², Eugene N. Krutsko¹

¹Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

²Research Institute of Physical and Chemical Problems of the Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

PHYSICOCHEMICAL ASPECTS OF STRUCTURING CALCIUM PHOSPHATE ON FIBRILLARY COLLAGEN SCAFFOLDS

Abstract. The structure and physicochemical properties of scaffolds obtained from acetate extracts of fibrillar collagen from the tendon membranes of Wistar rats have been the subject of study. The synthesis of a film-like scaffold at 37 °C and a volume scaffold at 6 °C was conducted. Scaffolds of both types are structured into glomerular and extraglomerular fractions. The volume ratios of fractions are determined by the influence of temperature on the kinking of collagen fibers. At 37 °C, kinking is suppressed, and a fraction with initially straightened fibers – the extracellular framework of a filmy scaffold – is formed. At 6 °C, kinking increases, and the growth of a fraction with initially twisted fibers – tangles of a volumetric scaffold – is accelerated. The typogenesis of hydroxyapatite is determined by the microstructure of the scaffolds and the direction of development of transpiring structures. Stoichiometric hydroxyapatite is synthesized in dominant water-evaporating fractions,

while carbonate hydroxyapatite is synthesized in subdominant water-retaining fractions. The relationship between kinking and the strength of the peptide chains of fibrillar collagen is characterized by an inverse interdependence. Specifically, when kinking is weakened, the peptide chains are strengthened, and when kinking is strengthened, they are softened. Carbonate substitutions are sensitive to the temperature of scaffold synthesis. At 37 °C, CO_3^{2-} anions replace OH^- , and at 6 °C, PO_4^{3-} groups replace them. The comprehension of the mechanisms underlying the structuring of calcium phosphates on matrices of fibrillary collagen is essential for the design of collagen-apatite-based scaffolds with predefined functional properties.

Keywords: scaffolds, apatitogenesis, stoichiometric hydroxyapatite, carbonate-hydroxyapatite, fibrillar collagen, mineralization *in situ*

For citation. Gaidash A. A., Kulak A. I., Krut'ko V. K., Musskaya O. N., Skrotskaya K. V., Krutsko E. N. Physico-chemical aspects of structuring calcium phosphate on fibrillary collagen scaffolds. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2025, vol. 69, no. 3, pp. 198–205 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2025-69-3-198-205>

Введение. Сырьевые перспективы сухожилий разрабатываются в рамках механобиологического, герминативного и биомиметического подходов [1]. В механобиологическом подходе сухожильные оболочки рассматриваются как генератор структур, сглаживающих механические напряжения: ламелл, сесамовидных глобул, энтез. Ламеллы – пластинки компактизированного фибриллярного коллагена, персистирующие в областях упрочняющегося матриксного флюида [2]. Глобулы – частицы, направленно транспортирующие в очаги механического напряжения медиаторы хондро- и остеогенеза. Энтезы – костно-сухожильные соединения, рассеивающие энергию в переходных структурах [3]. Герминативный подход исходит из способности сухожильных оболочек к сосредоточению прогениторных клеток, обеспечивающих регенерацию сухожильной и костной ткани [4; 5]. В рамках биомиметического подхода разрабатываются методы допирования коллагеновых материалов гидроксиапатитом: перемешивание, покрытие керамикой и шаблонами экстра-интрафибрилярного синтеза гидроксиапатита [6; 7]. Вышеприведенные подходы предполагают использование природного морфогенетического потенциала сухожильных оболочек без введения в искусственные материалы экзогенных факторов гистогенеза. Отсюда особую значимость приобретает изучение особенностей формирования гидроксиапатита *in situ* на матрицах фибриллярного коллагена с применением кристаллизационных инкубационных сред [8]. Ключевым механизмом минерализации коллагеновых волокон является структурирование кальцийфосфатов по апатитовому направлению. При этом типогенез формирующихся гидроксиапатитов, как предполагается, взаимосвязан с микроструктурой коллагеновых каркасов и внутримолекулярной динамикой фибриллярного.

Цель исследования – установить физико-химические особенности апатитогенеза во взаимосвязях со структурой коллагеновых каркасов и внутримолекулярной динамикой фибриллярного коллагена.

Материалы и методы исследования. Соединительнотканые оболочки сухожилий вырезали из хвостов крыс Вистар по методике, разработанной в Институте общей и неорганической химии НАН Беларуси, утвержденной этическим комитетом Института физиологии НАН Беларуси. Коллагеновый гель получен из ацетатных экстрактов сухожильных оболочек в Институте цитологии РАН [9]. Из геля получали скаффолды: пленчатый – прогреванием при 37 °C, объемный – охлаждением при 6 °C (в обоих случаях 3 сут.). Для сканирующей электронной микроскопии образцы фиксировали, обезвоживали, напыляли золотом и изучали на микроскопе LEO 420 (Carl Zeiss, Германия). Рентгенофазовый анализ выполнен на дифрактометре ADVANCE D8 (Bruker, Германия) с использованием базы ICDD PDF-2с: стехиометрический гидроксиапатит [01-084-1998], карбонат-гидроксиапатит [00-035-0180]. Ориентацию коллагеновых фибрилл рассчитывали с помощью индекса OI_{XRD} , кристалличность гидроксиапатита – индекса CI_{XRD} [10; 11]. ИК-спектры записаны на зондовом ИК-микроскопе Hyperion (Bruker, Германия) с морфологическим контролем при 15-кратном увеличении (Gir-objective) в диапазоне 600–4000 cm^{-1} .

Результаты и их обсуждение. Коллагеновый каркас скаффолдов структурируется на доминантные и субдоминантные фракции [12]. В пленчатом скаффолде доминирует внеклубковый каркас, клубковые образования субдоминантны. В объемном скаффолде доминируют клубковые образования, внеклубковый каркас субдоминантен. Морфогенез доминирующих фракций определяется трендом к упорядочению каркаса и развитием транспирирующих структур: увеличивает-

ся численная плотность, параллельность упаковки и ослабляется кинкинг коллагеновых волокон, поры спадаются и преобразуются в многокамерные образования открытого типа, увеличивается связность фибриллярных узлов (табл. 1). Морфогенез субдоминантных фракций определяют хаотизация каркаса и формирование водоудерживающих структур: коллагеновые волокна утолщаются, укорачиваются и повышается их способность к кинкингу, расширяются преобразованные в однокамерные формы поры, уменьшается связность фибриллярных узлов (табл. 1).

Т а б л и ц а 1. Морфометрические показатели скаффолдов

Table 1. Morphometric indicators of scaffolds

Параметр Parameter	Пленчатый скаффолд Film scaffold		Объемный скаффолд Volumetric scaffold	
	Клубки Globules	Внеклубковый каркас Extraglomerular framework	Клубки Globules	Внеклубковый каркас Extraglomerular framework
V_v – относительный объем фракции, %	$35,0 \pm 1,4$	$75,0 \pm 2,9$	$80,0 \pm 2,9$	$20,0 \pm 1,4$
D_{gl} – диаметр клубков, мкм	$85,2 \pm 3,1$	–	$58,1 \pm 2,4$	–
D_f – толщина волокна, мкм	$0,194 \pm 0,02$	$0,165 \pm 0,02$	$0,154 \pm 0,02$	$0,232 \pm 0,02$
l – длина волокна, мкм	$0,796 \pm 0,03$	$0,599 \pm 0,03$	$0,828 \pm 0,04$	$0,868 \pm 0,04$
N_{if} – численная плотность коллагеновых фибрилл, $n/\text{мкм}^2$	$0,218 \pm 0,01$	$0,156 \pm 0,01$	$0,325 \pm 0,01$	$0,225 \pm 0,01$
S_{vf} – удельная площадь поверхности коллагеновых волокон, $\text{мкм}^2/\text{мкм}^3$	$10,3 \pm 0,5$	$6,1 \pm 0,3$	$4,2 \pm 0,3$	$5,9 \pm 0,3$
D_p – диаметр пор, мкм	$0,349 \pm 0,02$	$0,241 \pm 0,02$	$0,276 \pm 0,02$	$0,323 \pm 0,02$
V_{vp} – относительный объем пор, %	$18,1 \pm 1,2$	$11,0 \pm 1,2$	$9,1 \pm 1,2$	$19,1 \pm 1,2$
S_{vp} – удельная площадь поверхности пор, $\text{мкм}^2/\text{мкм}^3$	$5,7 \pm 0,2$	$9,8 \pm 0,4$	$9,3 \pm 0,4$	$6,2 \pm 0,2$
r – связность узлов (число волокон, сходящихся в одном узле)	$4,7 \pm 0,2$	$5,2 \pm 0,2$	$5,5 \pm 0,2$	$4,5 \pm 0,2$

Дифрактограммы структурированы в пики аморфного и упругого рассеяния органической и минеральных фаз (рис. 1). Гало органических фаз расщеплены на доминантные и субдоминантные фракции. Индекс OI_{XRD} в доминантных фракциях (внеклубковая фракция пленчатого и клубки объемного скаффолдов) составляет 0,58, что указывает на упорядоченное состояние коллагеновой фракции скаффолдов. Минеральная фаза представлена гидроксиапатитом $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$, пирофосфатом кальция $\alpha\text{-Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7$ и трикальцийфосфатом $\alpha\text{-Ca}_3(\text{PO}_4)_2$. В пленчатом скаффолде пики гидроксиапатита узкие на полувысотах с четко оформленными полосами плоскостей (112) и (300) в диапазонах $32,07^\circ$ и $32,13^\circ$ 2θ (рис. 1, стрелки 3, 4), что свидетельствует об агрегации гидроксиапатита в крупные частицы. Индекс CI_{XRD} в пленчатом скаффолде составляет 52,2, в объемном – 37,1.

Полосы амидов I, II и III внеклубковой фракции пленчатого скаффолда сдвинуты в высокочастотную область (рис. 2), что свидетельствует об упрочнении пептидных связей в первичных, вторичных межцепочечных цепях фибриллярного коллагена. Положения полос связей растяжения PO_4 (ν^1), изгибных колебаний PO_4 (ν^3) соответствуют стехиометрическому гидроксиапатиту. Полосы связей CO_3 групповых (ν^3) сдвинуты в высокочастотную область, что в сочетании с доминированием площади подполосы карбонатного пика, относимого к замещениям А-типа, свидетельствует о замещении ОН-групп.

Полосы амидных комплексов в клубках пленчатого скаффолда сдвинуты в низкочастотную область (рис. 2), что свидетельствует о разупрочнении и гидратации первичных пептидных цепей фибриллярного коллагена. Полосы связей PO_4 (ν^1) и PO_4 (ν^3) сдвинуты в диапазон, относимый к карбонат-гидроксиапатиту. Значительное падение индекса $\text{InCO}_3/\text{InA I}$ (табл. 2) свидетельствует о декарбоксилировании первичных пептидных цепей, обусловленном повышенным расходом карбоксильных групп на образование водородных связей с ОН-группами воды. Колебания CO_3 (ν^3) представлены широкой полосой с доминированием низкочастотной подполосы, что в сочетании с повышенным индексом $\text{InCO}_3/\text{InPO}_4$ (ν^3) свидетельствует об интенсивных карбонатных замещениях по В-типу (табл. 2).

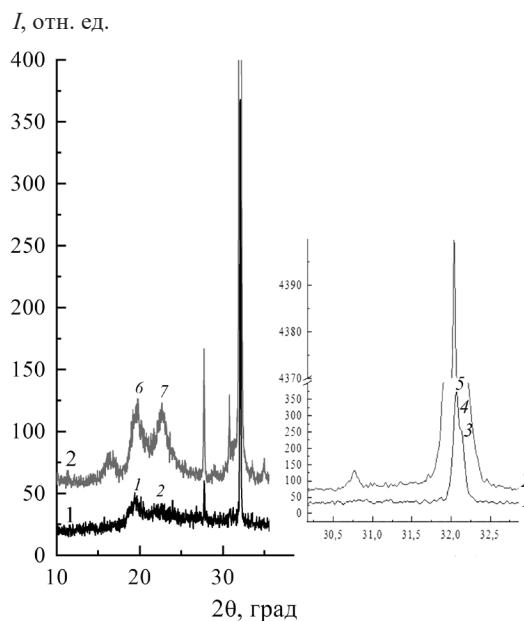


Рис. 1. Дифрактограммы образцов: 1 – пленчатый скаффолд: 1 – доминантная фракция, 2 – субдоминантная фракция, 3 – пик (300), 4 – пик (112), 5 – пик (211); 2 – объемный скаффолд: 6 – доминантная фракция, 7 – субдоминантная фракция

Fig. 1. Diffraction patterns of samples: 1 – filmy scaffold: 1 – dominant fraction, 2 – subdominant fraction, 3 – peak (300), 4 – peak (112), 5 – peak (211); 2 – volumetric scaffold: 6 – dominant fraction, 7 – subdominant fraction

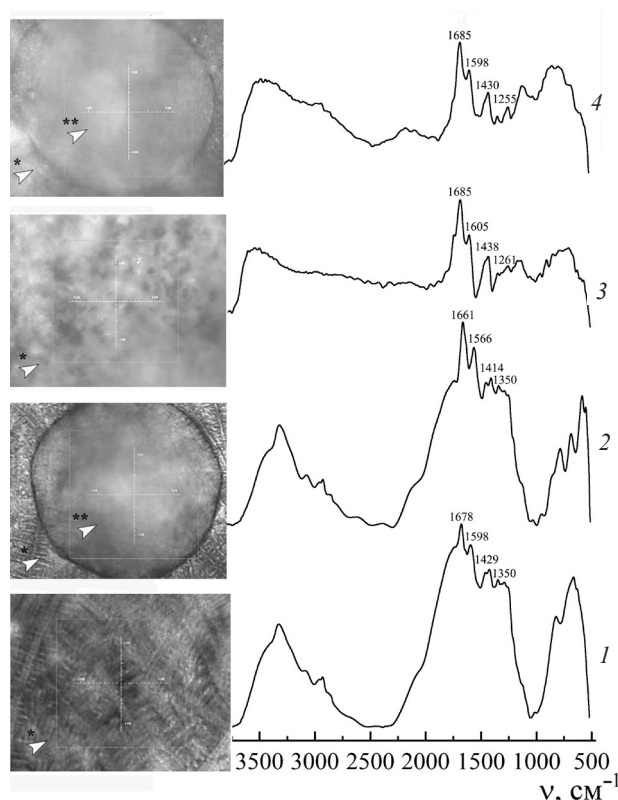


Рис. 2. Зондовая ИК-спектроскопия: точка съемки и ИК-спектр образцов: 1 – внеклубковый каркас* пленчатого скаффолда, 2 – клубок** пленчатого скаффолда, 3 – внеклубковый каркас* объемного скаффолда, 4 – клубок** объемного скаффолда

Fig. 2. Probe IR spectroscopy: shooting point and IR spectrum of samples: 1 – extraglomerular framework* of film scaffold, 2 – globule** of film scaffold, 3 – extraglomerular framework* of volumetric scaffold, 4 – globule** of volumetric scaffold

Таблица 2. Волновые числа (cm^{-1}) и соотношения интенсивностей полос ИК-спектров скаффолдовTable 2. Wave numbers (cm^{-1}) and the ratio of intensities of bands in the IR spectra of scaffolds

Молекулярная группа Molecular group	Пленчатый скаффолд Film scaffold		Объемный скаффолд Volumetric scaffold	
	Клубки Globuls	Внеклубковый каркас Extraglomerular framework	Клубки Globuls	Внеклубковый каркас Extraglomerular framework
<i>Кальцийфосфаты</i> <i>Calcium phosphates</i>				
PO_4 растяжения (ν^1)	952	1013	1025	966
PO_4 изгиба (ν^3)	1033	1122	1120	1022
CO_3 групповые	1409	1429	1427	1435
<i>Фибриллярный коллаген I типа</i> <i>Fibrillar collagen type I</i>				
Амид I	1664	1700	1682	1688
Амид II	1565	1594	1599	1606
Амид III	1342	1352	1248	1258
<i>Индексы интенсивностей характеристичных полос</i> <i>Intensity indices of characteristic bands</i>				
$\text{InCO}_3/\text{InA I}$	0,21	0,46	0,56	0,93
$\text{InCO}_3/\text{InPO}_4(\nu^3)$	3,16	2,01	3,41	9,71
$\text{InPO}_4(\nu^3)/\text{InA I}$	0,07	0,23	0,02	0,10

Во внеклубковой фракции объемного скаффолда полосы амидов I, II и III сдвинуты в высокочастотную область (рис. 2). Полосы PO_4 (ν^1) и PO_4 (ν^3) дислоцированы в диапазонах, относимых к карбонат-гидроксиапатиту. Уширенная полоса CO_3 (ν^3) смещена в низкочастотную область и высокие значения индексов $\text{InCO}_3/\text{InPO}_4$ (ν^3) свидетельствуют о карбонатных замещениях по В-типу. Повышение индексов $\text{InCO}_3/\text{InA I}$ и InPO_4 (ν^3)/ InA I (табл. 2) свидетельствует о карбоксилровании и насыщении фосфат-ионами фибриллярного коллагена. Полоса $3767,7 \text{ cm}^{-1}$ валентных колебаний гидроксильных групп в $\text{Ca}(\text{OH})_2$ свидетельствует о структурном «известковании» гидроксиапатита.

В клубках объемного скаффолда полосы амидного комплекса сдвинуты в низкочастотную область, что свидетельствует о разупрочнении и гидратации пептидных цепей и межцепочечных пространств фибриллярного коллагена. Падение индексов $\text{InCO}_3/\text{InA I}$ и InPO_4 (ν^3)/ InA I свидетельствует о декарбоксилровании коллагена и уменьшении насыщенности фосфат-ионами гидроксиапатита, ассоциированного с фибриллярным коллагеном (табл. 2). Полосы PO_4 (ν^1) и PO_4 (ν^3) связей находятся в диапазонах стехиометрического гидроксиапатита. Максимальный высокочастотный сдвиг полосы PO_4 (ν^1) свидетельствует о перераспределении электронной плотности в сторону усиления связи P–O, что ослабляет связь Ca–O и способствует «уходу» Ca^{2+} [13]. Полоса валентных колебаний гидроксильных групп в молекулах $\text{Ca}(\text{OH})_2$ регистрируется в характеристичном положении, но смещена в низкочастотную область, что может быть обусловлено большим, чем во внеклубковой фракции, ослаблением связей Ca–O. Выход Ca^{2+} из гидроксиапатита создает его локальный избыток в интерстиции. Последствием этого является усиление апатитогенеза на фибриллярном коллагене, обусловленное электростатическим связыванием ионами Ca^{2+} отрицательно заряженных соседних карбонильных и карбоксильных групп $\alpha 1(\text{II})$ -цепей коллагена с образованием сшивающих «ионных мостиков» [14]. Колебания связей CO_3 (ν^3) представлены широкой полосой, пик которой смещен в низкочастотную область (карбонатные замещения В-типа). Полоса растяжения OH на спектрах «жидкой» воды состоит из четырех субполос: $3523, 3481, 3438, 3400 \text{ cm}^{-1}$ (рис. 2). Первые две подполосы отнесены к связанной, остальные – к свободной воде. Доля связанной воды 0,81, свободной – 0,19. Приведенные соотношения водных долей свидетельствуют о том, что в каркасе клубков объемного скаффолда уменьшается количество свободной воды, а в системе гидроксиапатит–коллаген увеличивается количество связанной воды.

При температуре 37°C в условиях интенсивного испарения в связи с обезвоживанием разрушается структура водородных связей между молекулами тропоколлагена, межцепочечные

пространства спадаются, первичные цепи сближаются, более плотно упаковываются. При 6 °С в связи с формированием в клубках водоудерживающих структур и накоплением воды в межцепочечных пространствах возрастает прочность водородных связей карбоксильных групп с «водородными мостиками» интерстициальной воды, что препятствует расслоению, но ограничивает скольжение нитей тропоколлагена. Структурным последствием уплотнения является истончение и укорочение фибрилл (табл. 1), что ослабляет кинкинг – волокна выравниваются и упорядочиваются. Уменьшение извилистости повышает скорость диффузии воды и замедляет апатитогенез на коллагеновых волокнах [15]. Таким образом, в упорядоченных каркасах, образованных короткими, относительно прямолинейными коллагеновыми волокнами с расширенной гидратной оболочкой темпы апатитогенеза снижаются.

Заключение. Скаффолды, полученные из сухожильных оболочек, структурируются на клубковую и внеклубковую фракции. Температура синтеза скаффолдов определяет динамику кинкинга коллагеновых фибрилл. При температуре 37 °С подавляется кинкинг, в соответствии с чем опережающим темпом формируется фракция с исходно более расправленными волокнами – внеклубковый каркас пленчатого скаффолда. При температуре 6 °С кинкинг возрастает, что ускоряет формирование фракции с исходно более извитыми волокнами – клубки объемного скаффолда. Типогенез формирующихся гидроксиапатитов достаточно строго определен микроструктурой скаффолдов и направленностью развития транспирирующих структур: в доминантных фракциях с развитыми водоиспаряющими структурами синтезируется стехиометрический гидроксиапатит, в субдоминантных фракциях с преимущественно водоудерживающими структурами формируется карбонат-гидроксиапатит. Температура оказывает прямо направленное воздействие на кристалличность гидроксиапатитов: при 37 °С формируется гидроксиапатит повышенной кристалличности, при 6 °С – пониженной. Кинкинг и прочность пептидных цепей фибриллярного коллагена обратно взаимосвязаны: при ослаблении кинкинга пептидные цепи упрочняются, при усилении, наоборот, разупрочняются. Карбонатные замещения чувствительны к температуре синтеза скаффолдов: при 37 °С анионы CO_3^{2-} замещают OH^- , а при 6 °С – PO_4^{3-} группы. Апатитогенез, осуществляемый *in situ* в коллагеновых каркасах, отличается неоднородной чувствительностью к действию различных структурообразующих факторов.

Благодарности. Авторы благодарны сотрудникам группы тканевых технологий Института цитологии РАН за содействие в получении коллагенового геля. Работа выполнена при финансовой поддержке ГПНИ «Химические процессы, реагенты и технологии, биорегуляторы и биооргхимия» (задание 2.1.04.7).

Acknowledgements. The authors express their gratitude to the staff of the tissue technology group of the Institute of Cytology of the Russian Academy of Sciences for assistance in obtaining collagen gel. The work was supported by the SPSI “Chemical processes, reagents and technologies, bioregulators and bioorganic chemistry” (task 2.1.04.7).

Список использованных источников

1. The paratenon contributes to scleraxis-expressing cells during patellar tendon healing / N. A. Dymant, Ch.-F. Liu, N. Kazemi [et al.] // PLoS ONE. – 2013. – Vol. 8, N 3. – Art. e59944. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0059944>
2. Структура перитенонов паравerteбральных сухожилий, обработанных гиалуроновой кислотой / А. А. Гайдаш, В. К. Крутько, А. И. Кулак [и др.] // Успехи современной биологии. – 2023. – Т. 143, № 4. – С. 315–328. <https://doi.org/10.31857/S0042132423040063>
3. The skeletal attachment of tendons – tendon ‘entheses’ / M. Benjamin, T. Kumai, S. Milz [et al.] // Comparative Biochemistry and Physiology. Part A: Molecular and Integrative Physiology. – 2002. – Vol. 133, N 4. – P. 931–945. [https://doi.org/10.1016/s1095-6433\(02\)00138-1](https://doi.org/10.1016/s1095-6433(02)00138-1)
4. Mienaltowski, M. J. Tendon proper- and peritenon-derived progenitor cells have unique tenogenic properties / M. J. Mienaltowski, S. M. Adams, D. E. Birk // Stem Cell Research and Therapy. – 2014. – Vol. 5. – Art. 86. <https://doi.org/10.1186/scrt475>
5. Bone ridge patterning during musculoskeletal assembly is mediated through SCX regulation of *Bmp4* at the tendon-skeleton junction / E. Blitz, S. Viukov, A. Sharir [et al.] // Developmental Cell. – 2009. – Vol. 17, N 6. – P. 861–873. <https://doi.org/10.1016/j.devcel.2009.10.010>
6. Kuttappan, S. Biomimetic composite scaffolds containing bioceramics and collagen/gelatin for bone tissue engineering – A mini review / S. Kuttappan, D. Mathew, M. B. Nair // International Journal of Biological Macromolecules. – 2016. – Vol. 93, Part B. – P. 1390–1401. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.06.043>
7. Hu, C. Fabrication of intrafibrillar and extrafibrillar mineralized collagen/apatite scaffolds with a hierarchical structure / C. Hu, M. Zilm, M. Wei // Journal of Biomedical Materials Research. Part A. – 2016. – Vol. 104, N 5. – P. 1153–1161. <https://doi.org/10.1002/jbm.a.35649>

8. Development of a biomimetic collagen-hydroxyapatite scaffold for bone tissue engineering using a SBF immersion technique / A. A. Al-Munajjed, N. A. Plunkett, J. P. Cleeson [et al.] // *Journal of Biomedical Materials Research. Part B: Applied Biomaterials*. – 2009. – Vol. 90, N 2. – P. 584–591. <https://doi.org/10.1002/jbm.b.31320>
9. Chandrakasan, G. Preparation of intact monomeric collagen from rat tail tendon and skin and the structure of the non-helical ends in solution / G. Chandrakasan, D. A. Torchia, K. A. Piez // *Journal of Biological Chemistry*. – 1976. – Vol. 251, N 19. – P. 6062–6067. [https://doi.org/10.1016/s0021-9258\(17\)33059-4](https://doi.org/10.1016/s0021-9258(17)33059-4)
10. Collagen fibril orientation in ovine and bovine leather affects strength: A small angle X-ray scattering (SAXS) study / M. M. Basil-Jones, R. L. Edmonds, S. M. Cooper, R. G. Haverkamp // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. – 2011. – Vol. 59, N 18. – P. 9972–9979. <https://doi.org/10.1021/jf202579b>
11. Early diagenetic evolution of bone phosphate: An X-ray diffractometry analysis / A. Person, H. Bocherens, J.-F. Saliège [et al.] // *Journal of Archaeological Science*. – 1995. – Vol. 22, N 2. – P. 211–221. <https://doi.org/10.1006/jasc.1995.0023>
12. Структура и морфогенетические свойства коллагеновых матриц, полученных из соединительнотканых оболочек паравerteбральных сухожилий / А. А. Гайдаш, А. И. Кулак, В. К. Крутько [и др.] // *Успехи современной биологии*. – 2024. – Т. 144, № 3. – С. 265–290. <https://doi.org/10.31857/S0042132424030024>
13. Rietveld refinements and spectroscopic studies of the structure of Ca-deficient apatite / R. M. Wilson, J. C. Elliott, S. E. P. Dowker, L. M. Rodriguez-Lorenzo // *Biomaterials*. – 2005. – Vol. 26, N 11. – P. 1317–1327. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2004.04.038>
14. Rhee, S. H. Nucleation of hydroxyapatite crystal through chemical interaction with collagen / S. H. Rhee, J. D. Lee, J. Tanaka // *Journal of the American Ceramic Society*. – 2000. – Vol. 83, N 11. – P. 2890–2892. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2000.tb01656.x>
15. 3D Tortuosity and diffusion characterization in the human mineralized collagen fibril using a random walk model / F. Bini, A. Pica, A. Marinozzi, F. Marinozzi // *Bioengineering*. – 2023. – Vol. 10, N 5. – Art. 558. <https://doi.org/10.3390/bioengineering10050558>

References

1. Dymant N. A., Liu C.-F., Kazemi N., Aschbacher-Smith L. E., Kenter K., Breidenbach A. P., Shearn J. T., Wylie C., Rowe D. W., Butler D. L. The paratenon contributes to scleraxis-expressing cells during patellar tendon healing. *PLoS ONE*, 2013, vol. 8, no. 3, art. e59944. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0059944>
2. Gaidash A. A., Krut'ko V. K., Kulak A. I., Musskaya O. N., Skrotskaya K. V., Tokalchik Yu. P., Kulchitsky V. A. Structure of the peritenons of the paravertebral tendons treated by hyaluronic acid. *Biology Bulletin Reviews*, 2023, vol. 13, pp. 559–571. <https://doi.org/10.1134/s2079086423060075>
3. Benjamina M., Kumai T., Milz S., Boszczyk B. M., Boszczyk A. A., Ralphs J. R. The skeletal attachment of tendons – tendon ‘entheses’. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular and Integrative Physiology*, 2002, vol. 133, no. 4, pp. 931–945. [https://doi.org/10.1016/s1095-6433\(02\)00138-1](https://doi.org/10.1016/s1095-6433(02)00138-1)
4. Mienaltowski M. J., Adams S. M., Birk D. E. Tendon proper- and peritenon-derived progenitor cells have unique tenogenic properties. *Stem Cell Research and Therapy*, 2014, vol. 5, art. 86. <https://doi.org/10.1186/scrt475>
5. Blitz E., Viukov S., Sharir A., Shwartz Y., Galloway J. L., Pryce B. A., Johnson R. L., Tabin C. J., Schweitzer R., Zelzer E. Bone ridge patterning during musculoskeletal assembly is mediated through SCX regulation of *Bmp4* at the tendon-skeleton junction. *Developmental Cell*, 2009, vol. 17, no. 6, pp. 861–873. <https://doi.org/10.1016/j.devcel.2009.10.010>
6. Kuttappan S., Mathew D., Nair M. B. Biomimetic composite scaffolds containing bioceramics and collagen/gelatin for bone tissue engineering – A mini review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2016, vol. 93, part B, pp. 1390–1401. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.06.043>
7. Hu C., Zilm M., Wei M. Fabrication of intrafibrillar and extrafibrillar mineralized collagen/apatite scaffolds with a hierarchical structure. *Journal of Biomedical Materials Research. Part A*, 2016, vol. 104, no. 5, pp. 1153–1161. <https://doi.org/10.1002/jbm.a.35649>
8. Al-Munajjed A. A., Plunkett N. A., Gleeson J. P., Weber T., Jungreuthmayer C., Levingstone T., Hammer J., O'Brien F. J. Development of a biomimetic collagen-hydroxyapatite scaffold for bone tissue engineering using a SBF immersion technique. *Journal of Biomedical Materials Research. Part B: Applied Biomaterials*, 2009, vol. 90, no. 2, pp. 584–591. <https://doi.org/10.1002/jbm.b.31320>
9. Chandrakasan G., Torchia D. A., Piez K. A. Preparation of intact monomeric collagen from rat tail tendon and skin and the structure of the nonhelical ends in solution. *Journal of Biological Chemistry*, 1976, vol. 251, no. 19, pp. 6062–6067. [https://doi.org/10.1016/s0021-9258\(17\)33059-4](https://doi.org/10.1016/s0021-9258(17)33059-4)
10. Basil-Jones M. M., Edmonds R. L., Cooper S. M., Haverkamp R. G. Collagen fibril orientation in ovine and bovine leather affects strength: A small angle X-ray scattering (SAXS) study. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2011, vol. 59, no. 18, pp. 9972–9979. <https://doi.org/10.1021/jf202579b>
11. Person A., Bocherens H., Saliège J.-F., Paris F., Zeitoun V., Gerard M. Early diagenetic evolution of bone phosphate: An X-ray diffractometry analysis. *Journal of Archaeological Science*, 1995, vol. 22, no. 2, pp. 211–221. <https://doi.org/10.1006/jasc.1995.0023>
12. Gaidash A. A., Kulak A. I., Krut'ko V. K., Blinova M. I., Musskaya O. N., Aleksandrova S. A., Skrotskaya K. V., Kulchitsky V. A. Structure and morphogenetic properties of collagen matrixes obtained from connective tissue sheaths of paravertebral tendons. *Biology Bulletin Reviews*, 2024, vol. 14, pp. 758–778. <https://doi.org/10.1134/S2079086424600413>

13. Wilson R. M., Elliott J. C., Dowker S. E. P., Rodriguez-Lorenzo L. M. Rietveld refinements and spectroscopic studies of the structure of Ca-deficient apatite. *Biomaterials*, 2005, vol. 26, no. 11, pp. 1317–1327. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2004.04.038>
14. Rhee S. H., Lee J. D., Tanaka J. Nucleation of hydroxyapatite crystal through chemical interaction with collagen. *Journal of the American Ceramic Society*, 2000, vol. 83, no. 11, pp. 2890–2892. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2000.tb01656.x>
15. Bini F., Pica A., Marinozzi A., Marinozzi F. 3D Tortuosity and diffusion characterization in the human mineralized collagen fibril using a random walk model. *Bioengineering*, 2023, vol. 10, no. 5, art. 558. <https://doi.org/10.3390/bioengineering10050558>

Информация об авторах

Гайдаш Александр Александрович – д-р мед. наук, профессор, вед. науч. сотрудник. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: aljack880@gmail.com.

Кулак Анатолий Иосифович – академик, д-р хим. наук, профессор, директор. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: kulak@igic.bas-net.by.

Крутько Валентина Константиновна – канд. хим. наук, доцент, заведующий лабораторией. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: tsuber@igic.bas-net.by.

Мусская Ольга Николаевна – канд. хим. наук, доцент, вед. науч. сотрудник. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: musskaja@igic.bas-net.by.

Скроцкая Катарина Владимировна – инженер. НИИ физико-химических проблем БГУ (ул. Ленинградская, 14, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: Katarinaskr@gmail.com.

Крутько Евгений Николаевич – ст. науч. сотрудник. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: ev_krutsko@igic.bas-net.by.

Information about the authors

Gaidash Alexander A. – D. Sc. (Medicine), Professor, Leading Researcher. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: aljack880@gmail.com.

Kulak Anatoly I. – Academician, D. Sc. (Chemistry), Professor, Director. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kulak@igic.bas-net.by.

Krut'ko Valentina K. – Ph. D. (Chemistry), Assistant Professor, Head of the Laboratory. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: tsuber@igic.bas-net.by.

Musskaya Olga N. – Ph. D. (Chemistry), Assistant Professor, Leading Researcher. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: musskaja@igic.bas-net.by.

Skrotskaya Katarina V. – Engineer. Research Institute for Physical Chemical Problems of the Belarusian State University (14, Leningradskaya Str., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Katarinaskr@gmail.com.

Krutsko Evgeny N. – Senior Researcher. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ev_krutsko@igic.bas-net.by.

ISSN 1561-8323 (Print)

ISSN 2524-2431 (Online)

УДК 631.22.018

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2025-69-3-206-213>

Поступило в редакцию 06.02.2025

Received 06.02.2025

А. А. Ратько, член-корреспондент В. В. Шевчук, Ю. В. Дуко, академик Н. П. Крутько*Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь*

СПОСОБ ДЕЗОДОРАЦИИ И ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ КУРИНОГО ПОМЕТА С ЦЕЛЬЮ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ОРГАНОМИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ

Аннотация. В процессе работы птицеводческих комплексов происходит постоянное образование большого количества куриного помета, в связи с чем переработка органических отходов птицефабрик для получения экологически безопасных удобрений является весьма актуальной задачей. В настоящей работе проведены исследования по подбору композиции химических реагентов для обработки куриного помета с целью его последующего использования при производстве комплексных удобрений. Установлено, что дезодорирующим эффектом в отношении куриного помета в лабораторных и промышленных условиях обладают состав на основе персульфата аммония, формальдегида и надуксусной кислоты и состав, содержащий серную кислоту, гипохлорит натрия, гидроксид натрия и известковое молоко. Более предпочтительным с точки зрения быстроты наступления дезодорирующего эффекта является состав на основе персульфата аммония, формалина и надуксусной кислоты – эффект дезодорации при испытаниях на образцах помета объемом 100 л наступал через 40 мин после обработки. Оба состава продемонстрировали хорошую сохраняемость эффекта дезодорирования и обеззараживания (до 30 сут.). Обработанный таким образом куриный помет не представляет опасности для окружающей среды и может быть использован в качестве органической составляющей комплексных органоминеральных удобрений.

Ключевые слова: птицеводческие комплексы, химические методы обработки помета, запах помета, эмиссия газов, удаление запаха

Для цитирования. Способ дезодорации и обеззараживания куриного помета с целью его применения при производстве органоминеральных удобрений / А. А. Ратько, В. В. Шевчук, Ю. В. Дуко, Н. П. Крутько // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2025. – Т. 69, № 3. – С. 206–213. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2025-69-3-206-213>

Alexander A. Rat'ko, Vyacheslav V. Shevchuk, Yuliya V. Duko, Academician Nikolay P. Krut'ko*Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

METHOD OF DEODORIZATION AND DISINFECTION OF CHICKEN MANURE FOR ITS USE IN THE PRODUCTION OF ORGANO-MINERAL FERTILIZERS

Abstract. Chicken breeding facilities generate substantial quantities of chicken manure during their operation. Consequently, the processing of organic waste from these facilities is a pressing concern. In this work, a study was conducted on the selection of the composition of chemical reagents for processing chicken manure for the purpose of its subsequent use in the production of complex fertilizers. Research has demonstrated that a composition comprising ammonium persulfate, formaldehyde, and peracetic acid, as well as a composition containing sulfuric acid, sodium hypochlorite, sodium hydroxide, and lime milk, have a deodorizing effect on chicken manure in both laboratory and industrial conditions. From the standpoint of the rapidity with which the deodorizing effect is initiated, a formulation comprising ammonium persulfate, formalin, and peracetic acid is preferable. The deodorization effect was observed in 100-liter litter samples after a treatment period of 40 minutes. Both compositions demonstrated effective retention of their deodorizing and disinfection properties over a duration of up to 30 days. The utilization of chicken manure in this manner does not constitute a threat to the environment and can be used as an organic component of complex organomineral fertilizers.

Keywords: poultry farming complexes, chemical methods of manure treatment, manure odor, gas emissions, odor removal

For citation. Rat'ko A. A., Shevchuk V. V., Duko Yu. V., Krut'ko N. P. Method of deodorization and disinfection of chicken manure for its use in the production of organo-mineral fertilizers. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2025, vol. 69, no. 3, pp. 206–213 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2025-69-3-206-213>

Введение. Вопрос утилизации птичьего помета, сточных вод и непищевых отходов предприятий птицеводческой отрасли является весьма актуальным для стран всего мира, исключением не является и Республика Беларусь. Накопление органических необработанных продуктов жиз-

недеятельности птиц и сопутствующих производственных отходов, с одной стороны, целесообразность их крупномасштабной переработки, зависящая от стоимости процесса, – с другой, те два обстоятельства, которые требуют одновременного решения во избежание экологических и биологических проблем.

Птичий помет на 70 % состоит из питательных веществ, которые усваиваются растениями (азот, фосфор, калий, органические вещества, аминокислоты, белок и др.) – фосфора, азота и калия больше, чем в навозе свиней и крупного рогатого скота. В курином помете содержатся микроэлементы: в 100 г помета в пересчете на сухое вещество – железа 360–900 мг, цинка 12–35 мг, марганца 15–38 мг, кобальта 1,0–1,3 мг в виде комплексонатов [1]. Эта так называемая энергия корма, не использованная птицами, определяет высокую ценность помета как основы для органических удобрений. Кроме того, внесение органических удобрений увеличивает ферментативную и целлюлозолитическую активность почвы, улучшает ее микрофлору, снижает количество условно фитопатогенных грибов, не оказывая при этом фитотоксического действия [2].

Тем не менее, использование птичьего помета в виде удобрения имеет существенные недостатки с экологической точки зрения. Концентрация поголовья птиц на ограниченных территориях птицеферм приводит к значительным объемам птичьего помета, который можно отнести к категории опасных отходов. Результатом ферментативного расщепления аминокислот и деградации остатков непереваренного корма в органических отходах птицеферм является образование органических соединений 1, 2 и 3 класса опасности. Мочевая кислота (с течением времени при хранении преобразуется в мочевину), гипуровая и масляная кислоты, белковые вещества, меркаптаны, сложные эфиры, карбонильные соединения, карбоновые кислоты, фенолы и различные газы ответственны за специфический запах помета. Высокая биологическая активность птичьего помета при его длительном хранении на площадках складирования создает угрозу локального загрязнения почвы, поверхностных и грунтовых вод, становится источником загрязнения по микробиологическим и паразитологическим показателям.

Ежегодный выход пометной массы и сточных вод с повышенной концентрацией вредных веществ от одной средней по объемам производства птицефабрики (400 тыс. кур-несушек) составляет соответственно до 35 тыс. т пометной массы и свыше 400 тыс. м³ сточных вод с повышенной концентрацией вредных веществ [3]. По статистическим данным, в Беларуси поголовье птицы составляет 49,9 млн шт. в хозяйствах всех категорий. Объем образовавшегося куриного помета составляет свыше 1,56 млн т [4]. Поэтому исключительно важна переработка органических отходов птицефабрик, направленная на получение экологически безопасных удобрений, отвечающих нормативным требованиям санитарно-гигиенических норм Республики Беларусь. Одно из требований к органическому удобрению, производимому из птичьего помета, – отсутствие неприятного запаха, возбудителей инфекционных болезней, инвазионных заболеваний и отсутствие жизнеспособных семян сорняков.

Среди соединений – продуктов анаэробного разложения навоза – аммиак, сероводород и метиламин играют ключевую роль в формировании неприятного запаха. Так, вблизи бройлерного птичника концентрация аммиака может достигать 2,38 мг/м³ (предельно допустимая концентрация – 0,1 мг/м³), а содержание сульфидов – 1,0–15,0 мг/т [5].

Для контроля распространения неприятного запаха во время хранения и обращения с навозом используют химические и биологические реагенты. Среди коммерчески доступных реагентов для дезодорирования выделяют: маскирующие агенты, пищеварительные дезодоранты, адсорбенты, пищевые добавки и химические дезодорирующие препараты. Использование маскирующих агентов для предотвращения неприятного запаха не получило широкого распространения в связи с тем, что они разрушаются бактериями, их применяли для контроля распространения запаха на нефтедобывающих, текстильных и химических предприятиях. К пищеварительным дезодорантам относятся белки, оказывающие дезодорирующее действие лишь в некоторых случаях. Для поглощения неприятных запахов из воздуха используются также адсорбционные материалы – силикагель, активированный алюминий и активированный уголь. Пищевые добавки – вещества, которые добавляют в пищу с целью удаления запаха, и существует корреляционная зависимость между количеством вводимой в рацион питания пищевой добавки

и качеством запаха. К числу используемых пищевых добавок можно отнести дрожжи, сухую и влажную лактозу. В свою очередь, химические дезодоранты представляют собой бактерицидные препараты и сильные окислительные агенты, которые подавляют активность бактерий, ответственных за появление неприятного запаха и ликвидируют ее. Химические методы снижения загрязнения окружающей среды запахообразующими веществами подразумевают изменение природы загрязняющих веществ. Для связывания загрязняющих веществ кислотного характера (SO_2 , H_2S , HCl , NO_2 , летучие органические кислоты) применяются реагенты, проявляющие основные свойства, а для веществ, проявляющих свойства оснований (NH_3 , летучие амины), – кислотные реагенты.

Цель работы – исследование возможности применения химических реагентов для подавления неприятного запаха и обеззараживания помета и его последующего применения в качестве органической составляющей при производстве органоминеральных удобрений.

Материалы и методы исследования. В качестве объекта исследования использовался куриный помет Минского филиала ОАО «Агрокомбинат «Дзержинский». В роли модификаторов использовали ряд окислителей – персульфат аммония, надуксусную кислоту, гипохлорит натрия, перекись водорода и др. и стабилизаторы запаха – формальдегид, борную кислоту и др.

Первую партию образцов куриного помета обрабатывали смесью персульфата аммония (30 %-ный раствор) и формальдегида (30 %-ный раствор) в различных соотношениях, вторую – рабочим раствором надуксусной кислоты, для приготовления которого использовали 4 части ледяной уксусной кислоты, 1 часть пероксида водорода, 5 частей воды, подкисленной борной кислотой с добавлением изопропилового спирта.

В лабораторных условиях обработку помета проводили следующим образом: измеряли с помощью pH-метра «Seven Excellence» компании METTLER TOLEDO (США) исходный pH навозной смеси ($\text{pH}_{\text{исх}} = 6,2$). В мерный стакан объемом 600 мл помещали 300 г помета и раствор смеси персульфата аммония и формальдегида в количестве 6,3 мл (из расчета 21 л реагента/т помета), в течение 1 ч осуществляли перемешивание с помощью механической мешалки, чтобы реагент равномерно распределился в массе помета. По истечении одного часа смесь обрела более светлую окраску, $\text{pH} = 5,7$.

Через 1 сутки к смеси добавляли 2,1 мл надуксусной кислоты, из расчета 7 л реагента/т навозной смеси. Наблюдалось пенообразование. Объем смеси увеличился приблизительно на 13–15 %. Время экспозиции после добавления указанного реагента – 24 ч. Запах навоза уменьшился на 95 %. Изменение запаха определяли органолептическим методом.

С целью установления дезодорирующего и обеззараживающего эффекта при обработке куриного помета химическими реагентами различной природы дополнительно проводили обработку помета смесью серной кислоты и щелочного раствора гипохлорита натрия. В мерный стакан объемом 600 мл помещали 300 г помета (pH исходной смеси = 6,2). Навозную смесь подкисляли 30 %-ным раствором серной кислоты до достижения $\text{pH} = 5,0$. Через 2 часа вводили в смесь щелочной раствор гипохлорита натрия до достижения pH смеси 6,9, после чего в смесь вводили CaO (в виде 18 %-ного известкового молока) до достижения близкой к нейтральной реакции смеси ($\text{pH} = 7,3$). Время экспозиции – 48 ч.

После обработки химическими реагентами куриный помет подвергали термическому обеззараживанию в сушильном шкафу при температуре 110 °С.

Определение запаха помета проводили органолептическим методом. В качестве испытателей выступала группа людей в количестве 10 человек. Для того чтобы определить, могли ли испытатели обнаружить разницу между запахом тестируемого образца и запахом контрольного образца, использовали метод парного сравнения общей интенсивности запаха в соответствии с процедурой, описанной в ГОСТ Р 53161-2008 (ИСО 5495-2005)¹.

Для оценки запаха испытателям предоставляли образцы обработанного и высушенного помета и в качестве сравнения образцы необработанного помета. Образцы в количестве 30 г каждый помещали в воздухонепроницаемые емкости, перед проведением испытания выдерживали

¹ Органолептический анализ – Методология. Метод парного сравнения: ГОСТ Р 53161-2008. – Введ. 01.01.2010. – М.: Нац. стандарт РФ: Стандартинформ, 2010. – 20 с.

в темном месте в течение 24 ч при температуре $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$. Количество образцов адаптировали по количеству испытателей в группе. Основным требованием к помещению было отсутствие постороннего запаха. Требования к емкостям для проведения испытаний предъявлялись следующие: емкости не должны влиять на результаты испытания и должны быть абсолютно без запаха.

После этапа хранения тестировали запах атмосферы, возникшей в ограниченном пространстве емкости с упаковочным материалом или в упаковочном материале. Оценивают запах образцов немедленно после открытия емкостей. Для выполнения теста на запах каждый испытатель нюхал образцы сразу после удаления плотно притертой крышки, после чего емкость закрывали вновь.

Наличие запаха образцов оценивали по пятибалльной шкале в соответствии с табл. 1. Если расхождение в оценке запаха отдельными испытателями превышает один балл, оценку пробы повторяли не ранее чем через 30 мин. За окончательный результат испытания принимали среднее арифметическое результатов оценок, присужденных испытателями. Результат округляли до целого числа.

Т а б л и ц а 1. Оценка интенсивности запаха куриного помета

T a b l e 1. Assessment of chicken manure odor intensity

Запах Smell	Оценка Rating	Баллы Score
Запах не воспринимается	Отлично	0
Запах ощущается, недостаточно выраженный	Хорошо	1
Умеренный запах	Удовлетворительно	2
Сильный запах	Плохо	3
Очень сильный запах	Плохо	4

Результаты и их обсуждение. Запах куриного помета является результатом присутствия сложной смеси соединений переменного состава, поэтому контроль его интенсивности осуществляли в целом, а не по отдельным компонентам. Оценку запаха проводили органолептическим способом, как было описано выше. Результаты исследований по дезодорации куриного помета смесью персульфата аммония и формальдегида, различными количествами реагентов представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2. Результаты дезодорации помета смесью персульфата аммония и формальдегида

T a b l e 2. Results of deodorization of the manure using the mixture of ammonium persulphate and formaldehyde

Параметр Parameter	Образец Sample			
	1	2	3	4
$V_{\text{помета}}$	0,3 л	100 л	0,3 л	100 л
$\text{pH}_{\text{исх}}$	6,2			
Состав реагента – количество	$(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ – 4 мл CH_2O – 2,3 мл	$(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ – 320 г (в пересчете на сухое вещество) CH_2O – 207,1 мл (37 %-ного CH_2O)	$(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ – 3 мл CH_2O – 3,3 мл	$(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ – 300 г (в пересчете на сухое вещество) CH_2O – 270,3 мл (37 %-ного CH_2O)
Количество реагентов на 1 т навоза	$(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ – 3,2 кг (в пересчете на сухое вещество) CH_2O – 2,1 л (37 %-ного CH_2O)		$(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ – 3 кг (в пересчете на сухое вещество) CH_2O – 2,7 л (37 %-ного CH_2O)	
Интенсивность запаха навоза после сушки обработанных образцов	1	1	0	0

Из данных, представленных в табл. 2, следует, что стойкая нормализация запаха образцов как в лабораторных, так и в полупромышленных условиях достигалась для образцов 3 и 4, при этом время выдержки образца в лабораторных условиях до достижения эффекта дезодорации было значительно короче такового по сравнению с образцами больших объемов (1 и 6 суток

соответственно). Следует также отметить, что эффект первоначального дезодорирования куриного помета сохранялся в последующие 7 и более суток с момента обработки.

Наличие в составе дезодорирующей смеси персульфата аммония, обладающего высокой окислительной способностью по отношению к сульфидам помета, обеспечивает эффект дезодорации, а также приводит к подавлению активности сульфидообразующих бактерий. Дезодорирующее действие персульфата может быть усилено добавлением в состав смеси вспомогательных реагентов, например, формальдегида [6]. В [7] было показано, при обработке навоза данной смесью дезодорирующий эффект проявлялся через 15 мин после добавления реагентов и сохранялся на протяжении 3 дней, после чего неприятный запах возвращался. В связи с этим с целью окончательного избавления от неприятного запаха была проведена дополнительная обработка навозной смеси раствором надуксусной кислоты и раствором бисульфита натрия.

Надуксусная кислота, относящаяся к классу пероксидных соединений, уничтожает бактерии – разрушаются сероводородные (–SH) и дисульфидные (S–S) мостики в белках и ферментах при окислении. После обработки больших объемов навозных стоков дезодорирующей смесью, содержащей в своем составе надуксусную кислоту (образец № 1 объемом 100 л), эффект полной дезодорации наступал через 10 минут после обработки навозной смеси и сохранялся в течение 30 суток с момента обработки (табл. 3). Высокий дезодорирующий эффект реагентов объясняется синергическим действием индивидуальных компонентов реагентной смеси.

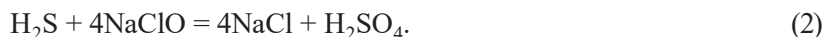
Т а б л и ц а 3. Влияние природы реагентов дезодорирующей смеси на интенсивность запаха промышленных образцов куриного помета

Table 3. The influence of deodorizing reagents on the intensity of odor of chicken manure industrial samples

Параметр Parametr	Образец Sample	
	1	2
Реагенты	Персульфат аммония, формальдегид, надуксусная кислота	Серная кислота, щелочной раствор гипохлорита натрия
$V_{\text{помета}}$	100 л	
$\text{pH}_{\text{исх}}$	6,2	
Состав реагента, количество (из расчета на 100 л навоза)	(NH_4) ₂ S ₂ O ₈ (30 %-ный раствор) – 1,6 кг CH ₂ O (30 %-ный раствор) – 0,384 кг Реагент на основе надуксусной кислоты – 0,280 л Уксусная кислота – 0,115 л H ₃ BO ₃ – 0,35 г H ₂ O ₂ – 30 мл Вода – остальное pH 5,9	H ₂ SO ₄ (30 %-ная) – 0,5 л NaClO (5,5 %-ный раствор) – 0,30 кг NaOH – 0,15 кг pH 5,3 CaO – 107,5 г (добавляли до достижения нейтральной среды)
Количество реагентов на 1 т навоза	(NH_4) ₂ S ₂ O ₈ – 16 кг CH ₂ O – 3,84 кг Реагент на основе надуксусной кислоты – 2,8 л Уксусная кислота – 1,15 л H ₃ BO ₃ – 3,5 г H ₂ O ₂ – 0,300 л Вода – остальное pH 5,95	H ₂ SO ₄ (30 %-ная) – 5 л NaClO (5,5 %-ный раствор) – 3,0 кг NaOH – 1,5 кг pH 5,3 CaO – 1,075 кг (добавляли до достижения нейтральной среды)
Эффект после сушки образцов	После сушки при температуре 110 °С до полного высыхания, запах навоза отсутствует. На 30-е сутки выдержки смеси зловонный запах отсутствует	После сушки при температуре 110 °С до полного высыхания, запах навоза отсутствует. На 30-е сутки выдержки смеси зловонный запах отсутствует

Для обработки образца № 2 объемом 100 л применяли смесь серной кислоты и гипохлорита натрия, описанную ранее в [8]. Для окончательного избавления от неприятного запаха и разрушения патогенных микроорганизмов, присутствующих в курином помете, дезодорирующий состав был дополнен гидроксидом натрия и оксидом кальция (CaO), которые вводили в смесь в виде известкового молока и жидкого концентрированного раствора гидроксида натрия [9].

Снижение запаха в образцах, обрабатываемых серной кислотой и гипохлоритом натрия, обусловлено связыванием летучих азотсодержащих соединений в нелетучие аммонийные соли и окислением сероводорода согласно уравнениям реакций (1) и (2):



Образование серной кислоты в результате обработки навозной смеси гипохлоритом натрия позволяет снизить расход первой для достижения положительного эффекта эксперимента. Эффект дезодорации при использовании указанных реагентов достигается за счет изменения pH обрабатываемых образцов и не зависит от возраста навозной смеси.

Деструкция патогенов происходит в результате увеличения pH в сочетании с ингибирующим эффектом действия аммиака, выделяющегося при уровне pH смеси выше 10. По результатам экспериментов полутора дней оказалось достаточно для разрушения микроорганизмов из пищеварительного тракта животных – содержание их в обработанном курином помете было ниже предела обнаружения.

Из данных, представленных в табл. 3, видно, что эффект полной дезодорации достигается в случае обеих смесей, но для образца, обработанного смесью персульфата аммония, формальдегида и надуксусной кислоты, неприятный запах пропадает быстрее (через 40 мин после обработки последним компонентом смеси) и сохраняется в течение как минимум 30 суток, тогда как в случае второго образца дезодорация навозных стоков наступает после 48 ч с момента обработки смеси последним реагентом и сохраняется также в течение 30 суток.

Изучено влияние гидросульфита натрия и известкового молока в дезодорирующей смеси на основе надуксусной кислоты на эффективность удаления запаха (табл. 4) и установлено, что наилучший эффект дезодорации достигается при использовании бисульфита натрия в качестве одного из компонентов смеси. Оптимальными с точки зрения быстроты наступления эффекта подавления неприятного запаха и его удержания (прекращения выделения зловонных газов) на продолжительное время являются композиции, содержащие в своем составе персульфат аммония, формальдегид, надуксусную кислоту и бисульфит натрия (образец № 1).

Т а б л и ц а 4. Влияние гидросульфита натрия и известкового молока на интенсивность запаха обработанного куриного помета

Table 4. The influence of sodium hydrosulphite and lime milk on the treated chicken manure's odor intensity

Параметр Parametr	Образец Sample			
	1	2	3	4
$V_{\text{помета}}$	100 л			
$\text{pH}_{\text{исх}}$	6,2			
Количество реагентов, необходимое для обработки 1 т помета	Персульфат аммония (30 %) – 16 кг формальдегид (30 %) – 3,84 кг Надуксусная к-та – 2,8 л Бисульфит натрия NaHSO_3 – 6 кг	Бисульфит натрия NaHSO_3 – 8,5 кг	Бисульфит натрия NaHSO_3 – 6 кг Надуксусная к-та – 10 л Известковое молоко – 0,5 л	Бисульфит натрия NaHSO_3 – 8 кг Надуксусная к-та – 10 л Известковое молоко – 0,5 л
Интенсивность запаха помета после сушки образцов	0	2	1	1

Закключение. В результате проведенных исследований показано, что дезодорирующим эффектом в отношении куриного помета в лабораторных и промышленных условиях обладают состав на основе персульфата аммония, формальдегида и надуксусной кислоты и состав, содержащий серную кислоту, гипохлорит натрия, гидроксид натрия и известковое молоко. Проведена оценка влияния концентрации дезодорирующих и обеззараживающих реагентов на эмиссию запахообразующих веществ куриного помета и для каждого из дезодорирующих составов опре-

делены оптимальные значения концентрации химических реагентов, обеспечивающих эффект дезодорации.

Более предпочтительным с точки зрения быстроты наступления дезодорирующего эффекта является состав на основе персульфата аммония, формалина и надуксусной кислоты – эффект дезодорации при испытаниях на образцах помета объемом 100 л наступал через 40 мин после обработки. Оба состава продемонстрировали хорошую сохраняемость эффекта дезодорирования и обеззараживания (до 30 суток), что является достаточным для проведения глубокой переработки куриного помета с целью его последующего использования в качестве органической составляющей комплексных удобрений, предназначенных для внесения под различные культуры.

Список использованных источников

1. Шмидт, А. Г. Использование куриного помета для оптимизации питания сельскохозяйственных культур в условиях южной лесостепи Западной Сибири: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук / Шмидт Александр Генрихович. – Омск, 2020. – 25 с.
2. Садохина, С. А. Использование органических удобрений на основе птичьего помета / С. А. Садохина // Сельская Сибирь: информационно-аналитический журнал. – 2020. – № 6. – С. 20–21. – URL: <https://sectormedia.ru/articles/ispolzovanie-organicheskikh-udobreniy-na-osnove-ptichego-pometa/> (дата обращения: 10.01.2025).
3. Максимова, С. Л. Утилизация отходов птицеводства при помощи биообъектов / С. Л. Максимова // Экология на предприятии. – 2014. – № 12. – С. 42–46.
4. поголовье скота и птицы на начало периода // Национальный статистический комитет Республики Беларусь. – URL: <http://dataportal.belstat.gov.by/Indicators/Preview?key=136770> (дата обращения: 10.01.2025).
5. Livestock farming and atmospheric emissions / G. Zicari, V. Soardo, D. Rivetti [et al.] // Hygiene and Public Health. – 2013. – Vol. 69, N 4. – P. 445–457
6. Ольфактометрические исследования выбросов запаха на российских предприятиях / М. А. Яценко-Хмелевская, В. В. Цибульский, Н. Г. Хитрина, Л. И. Короленко // Биосфера. – 2013. – Т. 5, № 3. – С. 303–310.
7. Ратько, А. А. Исследование влияния способа обработки свиных навозных стоков на эмиссию запахообразующих веществ / А. А. Ратько, Ю. В. Дуко, В. В. Шевчук // Весті Національної академії навук Беларусі. Серія аграрних навук. – 2022. – Т. 60, № 2. – С. 234–242. <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2022-60-2-234-242>
8. An overview of the control of bacterial pathogens in cattle manure / C. E. Mnyi-Loh, S. N. Mamphweli, E. L. Meyer [et al.] // International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2016. – Vol. 13, N 9. – Art. 843. <https://doi.org/10.3390/ijerph13090843>
9. Gerba, C. P. Sources of pathogenic microorganisms and their fate during land application of wastes / C. P. Gerba, J. E. Smith // Journal of Environmental Quality. – 2005. – Vol. 34, N 1. – P. 42–48. <https://doi.org/10.2134/jeq2005.0042a>

References

1. Shmidt A. G. *The use of chicken manure for optimizing the feed of agricultural plants in the conditions of Western Siberia forest prairie*. Omsk, 2020. 25 p. (in Russian).
2. Sadokhina S. A. The use of organic fertilizers based on chicken manure. *Selskaya Sibir* [Rural Siberia], 2020, no. 6, pp. 20–21. Available at: <https://sectormedia.ru/articles/ispolzovanie-organicheskikh-udobreniy-na-osnove-ptichego-pometa/> (Accessed 10 January 2025) (in Russian).
3. Maksimova S. L. Utilization of poultry waste using bio-objects. *Ecologiya na predpriyatii* [Ecology at the Enterprise], 2014, no. 12, pp. 42–46 (in Russian).
4. Livestock and poultry population at the beginning of the period. *Natsional'nyi statisticheskii komitet Respubliki Belarus'* [National Statistical Committee of the Republic of Belarus]. Available at: <http://dataportal.belstat.gov.by/Indicators/Preview?key=136770> (accessed 10 January 2025) (in Russian).
5. Zicari G., Soardo V., Rivetti D., Cerrato E., Russo D. Livestock farming and atmospheric emissions. *Hygiene and Public Health*, 2013, vol. 69, no. 4, pp. 445–457.
6. Yantzenko-Hmelevskaya M. A., Tsibulskii V. V., Hitrina N. G., Korolenko L. I. Olphractometric studies of the releases of odor at Russian enterprises. *Biosphera*, 2013, vol. 5, no. 3, pp. 303–310 (in Russian).
7. Ratko A. A., Dukou Yu. V., Shevchuk V. V. Study of effect of pig manure treatment method on emission of odor-forming substances. *Vesti Natsyynal'nyy akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2022, vol. 60, no. 2, pp. 234–242 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2022-60-2-234-242>
8. Mnyi-Loh C. E., Mamphweli S. N., Meyer E. L., Makaka G., Simon M., Okoh A. I. An overview of the control of bacterial pathogens in cattle manure. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2016, vol. 13, no. 9, art. 843. <https://doi.org/10.3390/ijerph13090843>
9. Gerba C. P., Smith J. E. Sources of pathogenic microorganisms and their fate during land application of wastes. *Journal of Environmental Quality*, 2005, vol. 34, no. 1, pp. 42–48. <https://doi.org/10.2134/jeq2005.0042a>

Информация об авторах

Ратко Александр Анатольевич – канд. хим. наук, заместитель директора. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: aratko@gmail.com. ORCID: 0000-0002-5741-4381.

Шевчук Вячеслав Владимирович – член-корреспондент НАН Беларуси, д-р хим. наук, заведующий лабораторией. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: shevchukslava@rambler.ru.

Дуко Юлия Владимировна – науч. сотрудник. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: julietta.fifochka@gmail.com. ORCID: 0000-0002-1984-6116.

Крутько Николай Павлович – академик, д-р хим. наук, профессор, заведующий отделом. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: ionch@igic.bas-net.by.

Information about the authors

Ratko Alexander A. – Ph. D. (Chemistry), Deputy Director. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: aratko@gmail.com. ORCID: 0000-0002-0516-1765.

Shevchuk Vyacheslav V. – Corresponding Member, D. Sc. (Chemistry), Head of the Laboratory. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: shevchukslava@rambler.ru.

Duko Yuliya V. – Researcher. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: julietta.fifochka@gmail.com. ORCID: 0000-0002-1984-6116.

Krutko Nikolay P. – Academician, D. Sc. (Chemistry), Professor, Head of the Department. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ionch@igic.bas-net.by.

БИОЛОГИЯ

BIOLOGY

UDC 575.174.015.3:581.9

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2025-69-3-214-221>

Received 22.10.2024

Поступило в редакцию 22.10.2024

Natalia V. Hudnaya, Aliaksandr N. Mialik, Corresponding Member Vladimir V. Titok

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

GENETIC DIVERSITY OF BELARUSIAN POPULATIONS
OF *LIPARIS LOESELII* (L.) RICH. (ORCHIDACEAE)

Abstract. The article presents the results of a study of the genetic diversity of *Liparis loeselii* (L.) Rich. populations using molecular iPBS markers. Samples for analysis were selected from six populations located at the southern border of the species' range in the Grodno, Minsk, and Vitebsk regions of Belarus. The findings indicate that higher levels of genetic diversity are associated with populations that exhibit larger areas, greater numbers of plants, and potentially older ages of the population itself. The predominance of intrapopulation genetic diversity (74 %), as well as a low level of gene flow, indicate that genetic drift significantly affects the formation of the genetic structure of *L. loeselii*. The obtained data generally indicate a low adaptive potential of *L. loeselii*. Consequently, an unfavorable forecast for its conservation in the wild is provided, taking into account the current climate dynamics, as well as successional changes occurring within the bog biotopes.

Keywords: protected plants, Orchidaceae, molecular iPBS markers, population structure

For citation. Hudnaya N. V., Mialik A. N., Titok V. V. Genetic diversity of Belarusian populations of *Liparis loeselii* (L.) Rich. (Orchidaceae). *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2025, vol. 69, no. 3, pp. 214–221. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2025-69-3-214-221>

Н. В. Гудная, А. Н. Мялик, член-корреспондент В. В. Титок

Центральный ботанический сад Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

ГЕНЕТИЧЕСКОЕ РАЗНООБРАЗИЕ БЕЛОРУССКИХ ПОПУЛЯЦИЙ
ЛОСНЯКА ЛЕЗЕЛЯ (*LIPARIS LOESELII* (L.) RICH. (ORCHIDACEAE))

Аннотация. Представлены результаты изучения генетического разнообразия популяций *Liparis loeselii* (L.) Rich. (лосняка Лезеля) с использованием молекулярных iPBS маркеров. Образцы для анализа были собраны в шести популяциях, произрастающих на территории Гродненской, Минской и Витебской областей. В результате проведенных исследований показано, что наибольшим уровнем генетического разнообразия характеризовались популяции с преобладающей численностью растений и, вероятно, возрастом происхождения. Преобладание внутрипопуляционного генетического разнообразия (74 %), а также невысокий уровень потока генов указывают, что генетический дрейф оказывает значительное влияние на формирование генетической структуры *L. loeselii*. В целом полученные данные свидетельствуют о невысоком адаптационном потенциале *L. loeselii*, что позволяет дать неблагоприятный прогноз его сохранения в естественных условиях с учетом климатических изменений, а также сукцессионных процессов, протекающих в болотных биотопах.

Ключевые слова: охраняемые растения, Орхидные, молекулярные iPBS маркеры, структура популяций

Для цитирования. Гудная, Н. В. Генетическое разнообразие белорусских популяций лосняка Лезеля (*Liparis loeselii* (L.) Rich. (Orchidaceae)) / Н. В. Гудная, А. Н. Мялик, В. В. Титок // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2025. – Т. 69, № 3. – С. 214–221. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2025-69-3-214-221>

Introduction. The reduction of native phytodiversity due to the disappearance of rare vulnerable plant species remains one of the most important environmental problems in Belarus. Currently, the most vulnerable group of plants are cold-resistant boreal species, which are located at the southern limit of their natural distribution in the country. Due to global climate change towards drying and warming,

the consequences of anthropogenic impacts, these cold-resistant species are in a particularly vulnerable position. Among them is *Liparis loeselii* (L.) Rich. – a rare relict species growing at the southern border of its range and included in the Red Book of the Republic of Belarus, where it is assigned the II category of protection as an endangered species [1]. It is also protected in all countries adjacent to Belarus, is rare throughout its vast range, and therefore is included in various international conservation documents on the conservation of biodiversity (Bern Convention, CITES Convention). Everywhere this species is characterized by a small number of coenopopulations, a sharp change in the number of plants over the years, as well as the absence of data on their structure in the scientific literature, which does not allow an objective assessment of its current state and prospects for preservation in the flora. In this regard, in recent years, the attention of researchers to this species has increased significantly. For example, data on the current distribution and ecological characteristics of the species in the Sverdlovsk [2] and Tver [3] regions of Russia, where *L. loeselii* remains an extremely rare species, have been summarized. The territory of the USA is also characterized by a decrease in the population of the species in more than half of the states, but at the same time, regular finds of the species in new habitats are noted [4], which is a reason to believe that the species can be preserved in the peripheral part of the range within the North American fragment of the range [5]. Confirmation of the above trend in Europe can be found by the find of *L. loeselii* in Bosnia and Herzegovina, where until recently this species was considered extinct [6]. For Belarus, there is also a known case of a large population of the species in the peripheral part of its range in the Gomel region [7].

Thus, to assess the current state of *L. loeselii* and develop a strategy for its conservation, a comprehensive approach is needed that takes into account current information on the chorology, ecological and biological characteristics of the species and its population structure. At the same time, one of the important criteria necessary for a better understanding of the state of *L. loeselii* populations is an assessment of their genetic diversity, which determines the ability of species to adapt to changing environmental conditions [8], which is especially important given modern climate change. One of the ways to assess the genetic heterogeneity of plant populations is to use molecular markers, which are considered effective tools for determining genetic diversity, since they are unlimited in number, demonstrate high polymorphism and do not depend on environmental factors [9]. Based on the above, the relevance and purpose of this work is determined – using molecular iPBS markers to assess the genetic diversity of Belarusian populations of *L. loeselii*, which are important in preserving the species in the peripheral part of the European fragment of the range.

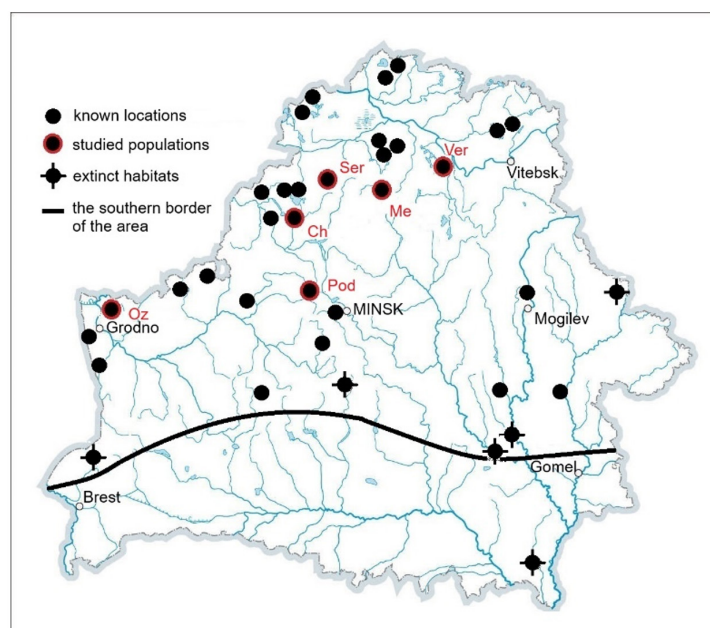
Materials and methods of the study. The object of the study is one of the rarest representatives of the Orchidaceae Juss. family in the flora of Belarus – *Liparis loeselii* (L.) Rich. It is a herbaceous perennial up to 20 cm high with an above-ground tuber and two lanceolate leaves close together at the base (Figure). Small yellowish-green flowers in the amount of 2–10 are collected in a sparse raceme. Their bracts are small, membranous, triangular or ovate-lanceolate, not longer than the peduncle. The outer leaflets of the perianth are linear-oblong, three-veined, the inner ones are narrowly linear, single-veined. The lip is almost equal in length to the other leaflets of the perianth. *L. loeselii* blooms in May–July, bears fruit in June–September. The fruit is a dry capsule with numerous small seeds. The plant reproduces by seeds and vegetatively [1; 3; 10].

L. loeselii is a circumpolar boreal species, distributed mainly in the temperate zone of Europe, Siberia and North America. In Belarus, it is located on the southern border of its range, occurring in its northern and central parts, completely absent from the Polesie Lowland (Figure), but reappears in isolated localities in the Ukrainian Polesie. Within Belarus, *L. loeselii* is usually characterized by small populations, including up to 100–200 plants [1]. The species grows in lowland sedge-hypnum and sedge-sphagnum bogs with rich mineral nutrition, as well as on lakeside trembling bogs.

The main threats to *L. loeselii* are economic transformation of lands and drainage of bogs, as well as increased recreational load on trembling bogs. However, there are cases of discovering new habitats of the species in anthropogenically transformed biotopes – abandoned peat extraction sites, overgrown quarries. For example, large populations were discovered in the Lipetsk region of Russia [11], in Belarus *L. loeselii* was recently discovered within the overgrown peat extraction site of the Urochishche Krasnoye nature reserve [12], which may indicate its plasticity.



a



b

Liparis loeselii (L.) Rich. (a) and its distribution on the territory of Belarus (b)

To study the genetic diversity and population structure of *L. loeselii*, a primer system based on conserved PBS (Primer Binding Site) sequences of LTR retrotransposons was chosen due to its ability to determine genetic diversity within and between populations, which is important for the development of scientifically based recommendations for the conservation of endangered species.

The initial material for assessing the genetic diversity of *L. loeselii* populations was samples of vegetative organs of plants collected during expeditionary research in the 2023 season in the Grodno, Vitebsk and Minsk regions. Using reconnaissance and route methods, populations of the species were found, their vitality was assessed, morphometric parameters were studied, a floristic description of phytocoenoses was made, and plant material from 5 plants in each population was selected for molecular genetic studies. Herbarium material, supplied with voucher labels, was also collected and stored in the herbarium of the Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus (MSKH). Docu-

mentation of sample collection sites was also carried out using the *inaturalist.org* information resource, which, if necessary, will allow finding these populations in the future and conducting monitoring studies. Below is a brief description of the studied model populations of *L. loeselii*, which includes a description of the geographic coordinates (a), phytocoenose (b), date and authors of sampling (c), and method of documentation (d).

Ozery (Oz): a) Grodno region, Grodno district, Novaya Ruda village, 0.7 km to the southwest, the Solomyanka river valley, WGS: 53.817401, 24.233517, b) swampy floodplain of the river, c) Mialik A. N., Dubar D. A., 01.08.2023, d) <https://www.inaturalist.org/observations/176123219>, MSKH Herbarium;

Podsady (Pod): a) Minsk region, Minsk district, Podsady village, 1.4 km to the north-northwest, WGS: 53.940666, 27.143562, b) short-grass mineral bog, c) Mialik A. N., Vabishchevich M. M., 21.08.2023, d) <https://www.inaturalist.org/observations/179547433>, MSKH Herbarium;

Chistets (Ch): a) Minsk region, Myadel district, Stakhovtsy village, 2.2 km to the southeast, Chistets bog, WGS: 54.761641, 26.800755, b) transitional sedge bog, c) Mialik A. N., Vabishchevich M. M., 21.08.2023, d) <https://www.inaturalist.org/observations/179548016>, MSKH Herbarium;

Servech (Ser): a) Vitebsk region, Glubokoe district, Derkovshchina village, 2.5 km to the southwest, Servech bog, WGS: 55.043302, 27.544799, b) transitional sedge-sphagnum bog, c) Mialik A. N., Dubar D. A., 23.08.2023, d) <https://www.inaturalist.org/observations/179862791>, MSKH Herbarium;

Mezhuzhol (Me): a) Vitebsk region, Dokshitsy district, Trostyanitsa village, 2.1 km to the northwest, Lake Mezhuzhol, WGS: 54.987533, 28.077744, b) lake trembling bogs, c) Mialik A. N., Dubar D. A., 23.08.2023, d) <https://www.inaturalist.org/observations/179861877>, MSKH Herbarium;

Verkudy (Ver): a) Vitebsk region, Ushachi district, Verkudy village, 3.1 km to the southwest, Lake Leshevo, WGS: 55.182747, 28.886998, b) lake trembling bogs, c) Mialik A. N., Dubar D. A., Kozlova O. N., 25.08.2023, d) <https://www.inaturalist.org/observations/180224884>, MSKH Herbarium.

When selecting markers for assessing the genetic structure of the studied *L. loeselii* populations, DNA was isolated from silica gel-dried leaves collected from 6 studied populations (5 samples from each of the Ozery, Podsady, Chistets, Servech, Mezhuzhol populations and 4 samples from the Verkudy population). The isolation was performed using the DNA-Extran-3 reagent kit (Synthol, Russia). The quality and quantity of the isolated DNA were checked using a NanoPhotometer Pearl Implen GmbH (Munich, Germany). A total of 30 iPBS primers were used in the study [13]. PCR was performed in 25 µl of the reaction mixture containing 25–50 ng of DNA, 5 µl of the ready-made ScreenMix PCR mixture (Eurogen, Russia), 1 mM primer for 12–13 bp primers or 0.6 mM for 18 bp primers, and water.

The PCR program consisted of: 1 cycle at 95 °C for 5 min; 38 cycles at 95 °C for 15 s, annealing was carried out at a temperature of 50.0–65.2 °C (depending on the primer) for 60 s, elongation at 68 °C for 90 s. The final elongation was carried out at 72 °C for 8 min. Amplification was carried out in a programmable thermostat C1000 Touch Thermal Cycler (MJ Research Inc., Bio-Rad Laboratories, USA). Electrophoresis was carried out at a voltage of 65 V for 5 hours in 2 % agarose gel. Ethidium bromide was used to stain the gel for 30 minutes and visualized using the UV Imager Gel Doc XR+ system (Bio-Rad, USA).

As a result, it was found that 7 of the 30 markers used were suitable (2271, 2081, 2242, 2076, 2079, 2080, 2270). Similar studies by Latvian colleagues allowed us to select only 3 markers, of which 2079 and 2270 are common [14]. Gradient PCR was performed with 7 selected markers to establish optimal annealing temperatures. The obtained values of optimal annealing temperatures are shown in Table 1. PyElph 1.4 was used to construct a binary matrix based on electrophoresis data. All electrophoresis bands that could be accurately recognized were assessed as present (1) or absent (0) and were considered as single dominant loci. The obtained data were recorded as a binary matrix, which was then processed using the PopGene 1.31 program to calculate the following parameters: the proportion of polymorphic loci (P), the effective (N_e) and observed numbers of alleles (N_a), the Shannon information index (I), Nei's gene diversity (H_e), total gene diversity (H_t), gene diversity in populations (H_s), the genetic differentiation coefficient $G_{st} = (H_t - H_s) / H_t$ and gene flow among populations (N_m). These parameters were chosen as the most suitable for analyzing the results obtained using dominant molecular markers. Calculation of the polymorphism information coefficient (PIC) and average genetic distance, analysis

of molecular variance (AMOVA) and principal coordinate analysis (PCoA) were performed using the GenALEX 6.5 software package. For the iPBS markers used, such indicators as the number of polymorphic loci, their proportion and the measure of polymorphism information coefficient (PIC) were established (Table 1).

Table 1. Characteristics of selected iPBS markers

iPBS marker	Recommended annealing temperature Ta (°C)	Sequence (5'–3')	Number of loci	Number of polymorphic loci	Proportion of polymorphic loci (P), %	Polymorphism Information Complexity (PIC)
2242	58.1	GCCCCATGGTGGGCGCCA	26	24	92.31	0.26
2076	58.4	GCTCCGATGCCA	31	29	93.55	0.25
2271	59.4	GGCTCGGATGCCA	26	21	80.77	0.21
2080	58.4	CAGACGGCGCCA	29	23	79.31	0.24
2081	57.6	GCAACGGCGCCA	27	22	81.48	0.23
2270	61.6	ACCTGGCGTGCCA	26	21	84.62	0.24
2079	61.4	AGGTGGGCGCCA	23	22	95.7	0.36
Average			26.86	23.14	86.82	0.26

For each primer, 23 to 31 loci and 21 to 29 polymorphic loci were obtained. The average number of loci and polymorphic loci for all primers was 26.86 and 23.14, respectively. The proportion of polymorphic loci averaged 86.82 %. The minimum polymorphism information coefficient (PIC) was obtained for marker 2271 (0.21), and the maximum for marker 2079 (0.36). All selected markers have a sufficiently high PIC value for their further use in studying the genetic diversity of *L. loeselii* populations.

Results and discussion. Based on the data obtained using molecular iPBS markers 2271, 2081, 2242, 2076, 2079, 2080, 2270, the following were calculated: the proportion of polymorphic amplicons, the effective and observed number of alleles, the Shannon information index, and Nei's gene diversity for each population of *L. loeselii*. The above parameters, as well as the total genetic diversity, genetic diversity in populations, the level of subdivision of populations, and gene flow between populations were calculated for all loci of the six studied populations of *L. loeselii* (Table 2).

Table 2. Parameters of genetic diversity of the studied populations of *Liparis loeselii* (L.) Rich.

Parameter	Model population						Common to populations
	Oz	Pod	Ch	Ser	Me	Ver	
Proportion of polymorphic loci (%)	45.21	31.91	46.28	42.02	34.04	45.74	87.23
Na	1.45 ± 0.04	1.32 ± 0.03	1.46 ± 0.04	1.42 ± 0.04	1.34 ± 0.03	1.46 ± 0.04	1.87 ± 0.02
Ne	1.30 ± 0.03	1.19 ± 0.02	1.27 ± 0.03	1.26 ± 0.03	1.21 ± 0.02	1.32 ± 0.03	1.37 ± 0.02
He	0.17 ± 0.01	0.11 ± 0.01	0.16 ± 0.01	0.15 ± 0.01	0.12 ± 0.01	0.18 ± 0.02	0.23 ± 0.01
I	0.25 ± 0.02	0.17 ± 0.02	0.24 ± 0.02	0.22 ± 0.02	0.18 ± 0.02	0.26 ± 0.02	0.37 ± 0.02
Ht							0.24 ± 0.002
Hs							0.15 ± 0.001
Gst							0.37
Nm							0.85

The analysis of the obtained data shows that the lowest proportion of polymorphic loci was found in the Podsady population – 31.91 %. Also for this population the lowest values of the effective and observed number of alleles, Shannon information index and Nei's gene diversity were found, which were 1.19, 1.32, 0.17 and 0.11 respectively. Thus, it can be concluded that the population under consideration is characterized by the lowest genetic diversity among all those studied, which is consistent with its small area and the low number of plants identified here during the survey. The Mezhuhol population, which is characterized by a small area and a low number of plants, also stands out for its relatively low genetic diversity (for example, the Nei's gene diversity index is only 0.12), which is characterized by a small area and a low number of plants.

The highest proportion of polymorphic loci was found in the Chistets population – 46.28 %, for the Ozery and Verkudy populations the similar indicator was 45.21 and 45.74 %, respectively. It is important to note that the similar indicator for the Latvian populations of *L. loselii* is significantly higher and varies from 48 to 84 % [15], which indicates their higher heterogeneity. The indicator of the observed number of alleles is the highest in two populations – Chistets and Verkudy – 1.46. Accordingly, the Verkudy population has the highest level of genetic diversity, since it has the highest values of the Shannon information index and Nei's gene diversity, which amounted to 0.26 and 0.18, respectively. According to the considered indicators, it is slightly inferior to the model populations Chistets and Servech, which are also characterized by a fairly high area and number of plants. Thus, it can be concluded that the Belarusian populations of *L. loselii* are characterized by a direct relationship between the level of genetic diversity, the area of the population and the number of plants in it, which must be taken into account when planning nature conservation measures. Perhaps this feature is also due to the greater age of the noted populations, which are located in large bog areas. Populations with the lowest genetic diversity (Podsady and Mezhuhol), on the contrary, are noted in small swamps and lake trembling bogs, and therefore are younger. A similar pattern is noted for Latvian populations of *L. loselii* [15].

To analyze the genetic variability of all six studied populations, the effective and observed number of alleles, Nei's gene diversity, Shannon information index and the proportion of polymorphic loci were calculated for all loci, which amounted to 1.87, 1.37, 0.23, 0.37 and 87.23 %, respectively. It is noteworthy that the same indicator for a similar boreal species *Goodyera repens* (L.) R. Br. is significantly lower (67.09 %), although it is characterized by a wider distribution and frequency of occurrence within Belarus [16]. The obtained data indicate a relatively high polymorphism of the Belarusian populations of *L. loselii*, their higher variability and adaptive potential.

The gene flow value was 0.85, indicating a significant influence of genetic drift in the formation of the genetic structure of *L. loselii* populations. Since this indicator is less than one, this indicates a disruption in gene exchange between populations of the species under study. Among other representatives of the *Orchidaceae* family, similar values were noted for *Goodyera repens* (L.) R. Br. (0.86) [16], while for the rarer species *Cephalanthera longifolia* (L.) Fritsch it is significantly lower and equals only 0.52 [17].

Analysis of the interpopulation and intrapopulation genetic structure showed that a smaller part, namely 37 % of the total genetic variability, is interpopulation (the genetic differentiation coefficient is 0.37), which indicates the occurrence of most genetic variations within populations.

Similar results are demonstrated by the AMOVA analysis (Table 3), which shows that most of the genetic diversity (74 %) is intrapopulation. Only 26 % of the genetic variation is observed between *L. loselii* populations. The estimates of variance were based on 999 permutations. The difference between individuals in the populations was statistically significant with a p value of <0.001 . The obtained value of pairwise population differentiation (PhiPT) is 0.212, which indicates a high level of genetic differentiation among populations, which is associated with the need to protect as many habitats as possible.

Table 3. AMOVA results for *Liparis loselii* (L.) Rich. populations

Source of variability	Number of degrees of freedom (df)	Sum of squares (SS)	Mean square (MS)	Dispersion	PhiPT	Share in variation
General	28	692.2	—	25.65	0.212*	—
Between populations	5	256.71	51.341	6.71		0.26
Within populations	23	435.5	18.94	18.94		0.74

Note. * – Differences are significant at a significance level of $p < 0.01$.

In general, the obtained data, demonstrating low genetic diversity of the studied populations of *L. loselii*, are consistent with the trends of decreasing numbers of this species in Belarus. The genetic isolation of populations and their low adaptive potential are one of the factors of high vulnerability of this species, which is confirmed by the disappearance of a number of habitats at the southern border of the range (Figure).

Conclusion. As a result of the conducted studies using molecular iPBS markers, the genetic diversity of *L. loeselii* populations located in Belarus near the southern border of the range was assessed. A low level of overall genetic diversity similar to other representatives of the Orchidaceae family was revealed for this species. Analysis of the population genetic structure demonstrates that *L. loeselii* is dominated by intrapopulation genetic variability (74 %), which, along with a low level of gene flow between populations, indicates their isolation.

In general, the analysis of the obtained data shows that *L. loeselii* is characterized by low genetic diversity of individual populations, which is associated with the low adaptive potential of this species, as well as an unfavorable prognosis for conservation in the wild, taking into account modern climate change, as well as successional changes occurring within marsh biotopes.

References

1. Kachanovskii I. M., Nikiforov M. E., Parfenov V. I., Borodin O. I., Pugachevskii A. V., Baichorov V. M., Gapienko O. S., Giryayev A. S., Evdaseva T. P. *Red Book of the Republic of Belarus. Plants: rare and endangered species of wild plants. 4th ed.* Minsk, 2015. 445 p. (in Russian).
2. Senator S. A., Tretyakova A. S., Grudanov N. Yu., Shilov D. S., Philippov D. A. *Liparis loeselii* (Orchidaceae) in the Sverdlovsk region, Russia. *Botanicheskii zhurnal = Botanical Journal*, 2022, vol. 107, no. 3, pp. 302–306 (in Russian).
3. Khomutovskiy M. I. Biology and ecology of *Liparis loeselii* (L.) Rich. (Orchidaceae Juss.) in the Tver region. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN = News of the Samara Scientific Center of the RAS*, 2013, vol. 15, no. 3–7, pp. 2105–2115 (in Russian).
4. Rolfsmeier S. B. *Liparis loeselii* (L.) Rich. (yellow widelip orchid): a technical conservation assessment. Prepared for the USDA Forest Service, Rocky Mountain Region, Species Conservation Project. Available at: https://www.fs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb5206990.pdf (accessed: 03.10.2024).
5. McMaster R. T. The population biology of *Liparis loeselii*, Loesel's twayblade, in a Massachusetts wetland. *Northeastern Naturalist*, 2001, vol. 8, no. 2, pp. 163–178. <https://doi.org/10.2307/3858369>
6. Milanovic D. *Liparis loeselii* (L.) Rich. – a plant rediscovered in the Balkan peninsula. *Botanica Serbica*, 2012, vol. 36, no. 2, pp. 85–89.
7. Lebedko V. N. A rare representative of the Orchidaceae family Juss. *Liparis loeselii* (L.) Rich. in the Gomel region of Belarus. *Okhrana i kul'tivirovaniye orkhidei: materialy X Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Protection and cultivation of orchids: Proceedings of the X International scientific and practical conference]. Minsk, 2015, pp. 130–133 (in Russian).
8. Leimu R., Mutikainen P., Koricheva J., Fischer M. How general are positive relationships between plant population size, fitness and genetic variation? *Journal of Ecology*, 2006, vol. 94, no. 5, pp. 942–952. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2006.01150.x>
9. Samantaray S., Ngangkham U. Evaluation of Genetic Diversity in *Chlorophytum borivilianum* (Santp. and Fernan.) Using Molecular Markers: An Endangered Medicinal Plant. *Active Ingredients from Aromatic and Medicinal Plants*, 2017. <https://doi.org/10.5772/66536>
10. Efimov P. G. *Orchids of the northwest of European Russia (Leningrad, Pskov, Novgorod regions). 2nd ed.* Moscow, 2012. 220 p. (in Russian).
11. Khlyzova N. Yu., Skolzneva L. N., Nedosekina T. V. Rare species *Cypripedium calceolus* and *Liparis loeselii* (Orchidaceae) also in the Lipetsk region. *Botanicheskii zhurnal = Botanical Journal*, 2009, vol. 94, no. 10, pp. 1594–1597 (in Russian).
12. Mialik A. N., Rovenskaya I. A., Fedyushko I. A., Ring V. I. Flora and vegetation of the local reserve “Urochische Krasnoe” (Ivyeyskiy district, Grodno region). *Aktual'nye problemy izucheniya i sokhraneniya fito- i mikrobioty: materialy III Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Actual problems of studying and preserving phyto- and mycobiota: Proceedings of the III International scientific and practical conference]. Minsk, 2020, pp. 49–54 (in Russian).
13. Kalendar R., Antonius K., Smýkal P., Schulman A. H. iPBS: a universal method for DNA fingerprinting and retrotransposon isolation. *Theoretical and Applied Genetics*, 2010, vol. 121, pp. 1419–1430. <https://doi.org/10.1007/s00122-010-1398-2>
14. Belogradova I., Grauda D., Jakobsone G., Roze D., Ornicans R., Fokina O., Rashal I. Usability of retrotransposon-based molecular marker system to assess genetic diversity of *Liparis loeselii*. *Acta Biologica Universitatis Daugavpiliensis*, 2012, vol. 12, no. 1, pp. 40–43.
15. Belogradova I., Grauda D., Lapina L., Jakobsone G., Roze D., Ornicans R., Fokina O., Rasha I. Genetic diversity of *Liparis loeselii* in Latvia. *Proceedings of the Latvian Academy of Sciences. Section B. Natural, Exact, and Applied Sciences*, 2018, vol. 72, no. 6, pp. 341–348. <https://doi.org/10.2478/prolas-2018-0042>
16. Samokhvalova N. V., Mialik A. N., Shlapakova T. G., Kruchonok A. V. Evaluation of genetic variability of *Goodyera repens* (L.) R. Br. populations in Belarus using molecular iPBS markers. *Botanika. Issledovaniya = Botany. Research*, 2023, no. 52, pp. 28–37 (in Russian).
17. Hudnaya N. V., Mialik A. N., Kulahina T. G., Titok V. V. Genetic variability of *Cephalanthera longifolia* (L.) Fritsch populations in Belarus. *Botanika. Issledovaniya = Botany. Research*, 2024, no. 53, pp. 114–122 (in Russian).

Information about the authors

Hudnaya Natalia V. – Researcher. Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus (2v, Surganov Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: N.Samakhvalava@cbg.org.by.

Mialik Aliaksandr N. – Ph. D. (Biology), Head of the Sector. Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus (2v, Surganov Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: aleksandr-Mialik@yandex.ru.

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

Информация об авторах

Гудная Наталья Владимировна – науч. сотрудник. Центральный ботанический сад НАН Беларуси (ул. Сурганова, 2в, 220012, Минск, Республика Беларусь). E-mail: N.Samakhvalava@cbg.org.by.

Мялик Александр Николаевич – канд. биол. наук, заведующий сектором. Центральный ботанический сад НАН Беларуси (ул. Сурганова, 2в, 220012, Минск, Республика Беларусь). E-mail: aleksandr-Mialik@yandex.ru.

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

МЕДИЦИНА

MEDICINE

УДК 616-008.9-021.6:613.24-613:292

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2025-69-3-222-233>

Поступило в редакцию 31.10.2024

Received 31.10.2024

С. Г. Пашкевич¹, С. А. Гордынец², Л. А. Чернявская², Т. В. Кусонская², О. Г. Тихонович¹,
А. Э. Пыж¹, Ж. А. Гладкова¹, О. Е. Соболева¹, Я. Д. Демина¹, Ю. В. Ксеневиц¹, А. В. Волков¹,
Д. П. Токальчик¹, член-корреспондент Н. С. Сердюченко

¹Институт физиологии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь²Институт мясо-молочной промышленности, Минск, Республика Беларусь

КОРРЕКТИРУЮЩИЙ РАЦИОН В МОДЕЛИ АЛИМЕНТАРНОГО ОЖИРЕНИЯ

Аннотация. Проведены физиологические исследования для подтверждения функциональных свойств новых видов мясных продуктов, предназначенных для питания детей младшего школьного возраста с повышенным индексом массы тела. Новые высококачественные мясные продукты, использованные в данном исследовании, имели пониженную калорийность (энергетическая ценность на 30 % ниже, чем у традиционных продуктов для детей младшего школьного возраста), не содержали специфических добавок, сохраняя при этом качество и привлекательность продукта. В эксперименте выявили особенности изменений параметров ориентировочно-двигательных рефлексов, координации и выносливости, выполнили общий и биохимический анализ крови, проанализировали и оценили метаболическую активность бифидо- и лактобактерий толстого кишечника в физиологической норме и после изменения диеты. Полученные данные свидетельствуют о том, что коррекция рациона питания является достаточной для начала положительной динамики в противодействии неблагоприятным изменениям в организме, вызванным избыточным потреблением высококалорийной пищи.

Ключевые слова: ожирение, нейромоторная функция, когнитивные показатели, биохимические и микробиологические показатели, крысы, корректирующая диета

Для цитирования. Корректирующий рацион в модели алиментарного ожирения / С. Г. Пашкевич, С. А. Гордынец, Л. А. Чернявская [и др.] // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2025. – Т. 69, № 3. – С. 222–233. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2025-69-3-222-233>

Svetlana G. Pashkevich¹, Svetlana A. Gordynets², Lilia A. Chernyavskaya², Tatsiana V. Kusonskaya²,
Olga G. Tikhonovich¹, Anna E. Pyzh¹, Zhanna A. Gladkova¹, Olga E. Soboleva¹, Yana D. Dyomina¹,
Julia V. Ksenevich¹, Arseniy V. Volkov¹, Dmitry P. Tokalchik¹, Corresponding Member Nikolai S. Serdyuchenko

¹Institute of Physiology of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus²State Enterprise Institute of Meat and Dairy Industry, Minsk, Republic of Belarus

THE CORRECTIVE DIET OF ALIMENTARY OBESITY MODEL

Abstract. Physiological studies were conducted to confirm the functional properties of new types of meat products intended for the nutrition of primary school children with an elevated body mass index. The recently developed high-quality meat products used in this study had reduced caloric content, with energy values 30 % lower than traditional products for primary school children, and no specific additives were present while maintaining product quality and appeal. The experiment revealed distinctive changes in parameters such as exploratory and locomotor reflexes, coordination, and endurance. A complete blood count and biochemical analysis were performed, and the metabolic activity of bifido- and lactobacteria in the large intestine was analyzed and evaluated both in physiological normalcy and after diet modification. The findings indicate that dietary correction is sufficient to initiate positive dynamics in counteracting adverse changes in the body caused by excessive consumption of high-calorie food.

Keywords: obesity, neuromotor function, cognitive performance, biochemical and microbiological parameters, weanling rats, corrective diet

For citation. Pashkevich S. G., Gordynets S. A., Chernyavskaya L. A., Kusonskaya T. V., Tikhonovich O. G., Pyzh A. E., Gladkova Zh. A., Soboleva O. E., Dyomina Ya. D., Ksenevich J. V., Volkov A. V., Tokalchik D. P., Serdyuchenko N. S.

The corrective diet of alimentary obesity model. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2025, vol. 69, no. 3, pp. 222–233 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2025-69-3-222-233>

Введение. Международное медицинское сообщество в настоящее время признает необходимость принятия срочных мер по предотвращению распространения «эпидемии детского ожирения» [1]. Избыточная масса тела у растущего организма сопровождается: задержкой нормальных процессов роста и развития; накоплением висцерального жира; уменьшением количества мышечной ткани; нарушением обмена веществ; снижением когнитивных функций; неблагоприятными прогнозами развития хронических патологических процессов всех органов и систем и др. [2]. Главной причиной детского ожирения полагают избыточное поступление калорий с пищей и недостаточную физическую активность [3]. Основным критерием развития детского ожирения является увеличение объема подкожно-жировой клетчатки [4].

Диагностируемый диет-индуцированный или алиментарный тип ожирения у детей, как правило, проявляется избытком жира в области живота, бедер, ягодиц, спины, груди, лица и рук. Патология сопровождается снижением чувствительности к физической нагрузке, появлением одышки даже при небольшой активности. При отсутствии лечения лишний вес становится причиной развития резистентности к инсулину, метаболического синдрома, сахарного диабета, артериальной гипертензии, нефропатии, снижения репродуктивной функции, развития когнитивных нарушений, сопровождается инвалидизацией, что влечет за собой необходимость повышения финансовых вложений, включая бюджетные, на лечение, реабилитацию и др. [5].

Предупредить развитие заболеваний призваны корректирующие диеты и изменение пищевого поведения, однако сформированные пищевые привычки сложно преодолеть. Поэтому диетическая еда должна быть как полезной, так и привлекательной для ребенка. Поскольку в меню детей младшего школьного возраста традиционно присутствуют котлеты, сосиски, акцентировали внимание на возможности снижения последствий развития ожирения уменьшением калорийности данных продуктов [1–5].

Функциональные пищевые продукты предназначены для систематического потребления в составе рационов, обладают научно обоснованными и подтвержденными свойствами, снижающими риск развития заболеваний, связанных с питанием, предотвращая или восполняя в организме дефицит питательных веществ, сохраняя или улучшая здоровье за счет наличия в составе сбалансированных пищевых ингредиентов. Данные продукты питания являются альтернативой высококалорийной диете и призваны корректировать те неблагоприятные проявления, которые еще не привели к патологическим процессам, однако уже являются предикторами для развития симптомов и заболеваний, обусловленных алиментарным ожирением. К мясным продуктам функционального питания относят специализированные мясные (мясосодержащие) продукты, включая биологически активные добавки к пище, оказывающие регулирующее воздействие на организм с учетом имеющейся патологии, нормализуя его функции в целом или оказывая влияние на определенные функции, что позволяет применять его в качестве профилактики заболеваний [5].

Для обоснования биологической модели обратили внимание на физиологические функции крыс, которые достаточно близки к таковым человека: имеют сходные вкусовые рецепторы и системы идентификации, переваривания пищи, близки нейроанатомически в отношении областей мозга, контролирующих потребление пищи, однако существуют и видовые различия: в печени крыс фермент дельта-5-десатураза обладает большей активностью, чем у людей, у крыс отсутствует желчный пузырь и желчные кислоты выделяются непосредственно из печени в кишечник, а особый пул хиохолевых и мурихолевых кислот обеспечивает устойчивость крыс к возрастанию уровня сывороточного холестерина [6]. Применение метаболических коэффициентов доз пищевых продуктов и добавок позволяет учесть видовые особенности метаболизма [7].

Диет-индуцированные модели ожирения используют для быстрой оценки системных и органоспецифических нарушений, вызываемых избыточной массой тела для последующей их коррекции [7]. На баланс микроорганизмов кишечника наибольшее влияние оказывают режим питания, возраст, однообразное питание, дефицит витаминов и микроэлементов, чрезмерное

потребление жиров. Изменение структуры микробиоценоза кишечника, главным образом, молочнокислой микрофлоры, предрасполагает к различным патологическим состояниям. Экспериментально установлена прямая связь между ожирением и дисбиотическими нарушениями микрофлоры кишечника [8; 9].

Эффекты корректирующей диеты изучали с применением новых мясных продуктов со сниженной калорийностью (разработка РУП «Институт мясо-молочной промышленности НАН Беларуси»).

Цель работы – провести физиологические исследования по изучению функциональных свойств новых видов мясных продуктов для питания детей младшего школьного возраста с повышенным индексом массы тела на биомодели «младший школьный возраст».

Материалы и методы исследования. В исследование взяты крысы самцы Вистар ($n = 48$, $m = 54 \pm 3$ г). Эксперименты выполнены в Институте физиологии НАН Беларуси после утверждения комиссией по биоэтике (протокол № 4 от 02 апреля 2024 г.) и в соответствии с этическими нормами обращения с животными, а также требованиями мирового сообщества «Европейская конвенция по защите позвоночных животных, используемых для экспериментальных и иных научных целей» (European convention for the protection of vertebrate animals used for experimental and other scientific, 2005) и проведены в светлое время суток.

Крыс стратифицировали по массе тела, в клетках размещали по 8 особей, маркировали безопасным спиртосодержащим маркером (цвет черный, арабские цифры, нумерация по сериям исследований). Животных взвешивали до начала эксперимента, затем один раз в 7 суток.

Распределение экспериментальных групп и основные виды экспериментальных манипуляций:

Группа 1 – контроль (рацион вивария, $n = 8$);

Группа 2 – рацион вивария + высококалорийная диета ($n = 8$);

Группа 3 – рацион вивария + сосиски ($n = 8$);

Группа 4 – рацион вивария + котлеты ($n = 8$);

Группа 5 – рацион вивария + высококалорийная диета с заменой на 21-е сутки на сосиски ($n = 8$);

Группа 6 – рацион вивария + высококалорийная диета с заменой на 21-е сутки на котлеты ($n = 8$).

Для изучения корректирующей диеты в питании экспериментальных животных использовали новые мясные продукты с пониженной калорийностью (в 100 г 180 ккал (колбасные изделия), 160 ккал (полуфабрикаты)), по сравнению с традиционными продуктами для питания детей дошкольного и школьного возраста (изделия колбасные – 246 ккал; полуфабрикаты – 228 ккал), изготавливаемыми по СТБ 2247 и СТБ 2295. Энергетическая ценность снижена на 30 %. Рецептуры новых мясных продуктов (сосиски и полуфабрикаты котлет), использованных в исследовании, включали качественное мясо цыплят, выращенных без специфических добавок. В состав новых мясных продуктов включены комплексные добавки «Маяк» и «Калейдоскоп» (УП «Уни-техпром БГУ», Беларусь).

Учитывая особенности метаболизма, в модели диет-индуцированного ожирения крысят основными ориентирами выбрали следующие показатели: индекс Ли, холестерин крови, индекс инсулинорезистентности, титры бифидо- и лактобактерий толстого кишечника, показатели выносливости и ориентировочно-двигательные рефлексы. Моделирование диет-индуцированного ожирения начинали с 28 суток постнатального онтогенеза (крысята-отъемыши) в течение 21 суток. Этот возраст крысят соответствует периоду постнатального онтогенеза человека 7–8 лет (биомодель «младший школьный возраст»). Стандартный рацион вивария дополняли высоким содержанием жиров, при котором 71 % энергии поступает из жиров, 11 % из углеводов и 18 % из белков [6; 8].

Развитие ожирения оценивали по изменению росто-весовых параметров (масса тела, длина тела, окружность живота). Также рассчитывали индекс ожирения Ли:

$$\text{Индекс Ли} = \frac{\sqrt[3]{m}}{l} 1000,$$

где m – масса (г); l – расстояние от ануса до носа (см). Значение выше 310 свидетельствует о наличии ожирения у животного [8].

Выносливость и координацию регистрировали в тесте «Вис на горизонтальной струне», который представляет собой кубическую конструкцию без верхней и передней стенок со сторонами $45 \times 40 \times 40$ см. К боковым стенкам на высоте 43 см от дна крепится металлическая проволока диаметром 1 мм. Между натянутой проволокой и краем бортика расстояние составляет 2 см. Животное подносят к горизонтально натянутой проволоке для инициации хватательного рефлекса, затем аккуратно отпускают и включают секундомер, далее оценивают время, которое крыса может удержаться на проволоке.

Ориентировочно-двигательные рефлексы изучали в приподнятом крестообразном лабиринте, который состоит из четырех крестообразных рукавов, расходящихся под прямым углом от центральной площадки. Установка для проведения теста приподнята на 80 см, два противоположных рукава открыты, оставшиеся – закрыты. Животное помещают в центральную зону установки головой к открытому рукаву и в течение трех минут проводят регистрацию времени пребывания в открытых, закрытых рукавах, центральной площадке, число свешиваний, стоек, а также количество актов груминга [10].

Для подтверждения модели и изучения влияния диеты на организм выполняли биохимический анализ крови колориметрическим методом: в сыворотке крови определяли содержание глюкозы, общего белка, альбумина, общего холестерина (ОХС), холестерина в липопротеинах высокой (ЛПВП) и низкой (ЛПНП) плотности, триглицеридов (ТГ; Diasens, Беларусь). Количество инсулина оценивали иммуноферментным методом с помощью ИФА-набора (ER1113 Rat INS (Insulin) ELISA Kit, Fine Test, Китай).

Индекс атерогенности (ИА) вычисляли по формуле: $(\text{ОХС} - \text{ЛПВП}) / \text{ЛПВП}$. Для характеристики инсулинорезистентности рассчитывали показатель НОМА-IR: $(\text{содержание инсулина (пмоль/л)} \times \text{содержание глюкозы (ммоль/л)}) / 155$. Для проведения расчетов предварительно проводили пересчет полученных единиц измерения $(\text{нг/мл} / 4,541 = \text{пмоль/л})$.

Гематологический статус (общий анализ крови) оценивали по следующим показателям: количество лейкоцитов (WBC), количество эритроцитов (RBC), уровень гемоглобина, гематокрит (HCT), средний объем эритроцита (MCV), среднее содержание гемоглобина в эритроците (MCH), средняя концентрация гемоглобина в эритроцитах (MCHC), ширина распределения эритроцитов по объему (RDW-CV), тромбоциты (PLT), средний объем тромбоцитов (MPV), ширина распределения тромбоцитов по объему (PDW), тромбоцит (PCT).

Для оценки количества молочнокислых микроорганизмов проводили забор фекалий (стерильным пинцетом в стерильные полипропиленовые пробирки) у крысят, содержащихся на различных рационах питания, затем проводили количественный анализ колониеобразующих единиц молочнокислых бактерий толстого кишечника при посеве на стандартные среды.

Посев осуществляли на чашки Петри (90 мм, одноразовая, односекционная, стерильная) на бифидум-среду (серия 053-к-53; ФБУН ГНЦ ПМБ, РФ) и лактобакагар (серия 054-к-39; ФБУН ГНЦ ПМБ, РФ).

Титр молочнокислых микроорганизмов ($\log$ КОЕ/г) определяли в соответствии с методическими указаниями¹. Метаболическую активность бифидобактерий учитывали по интенсивности кислотообразования в среде культивирования, которая коррелирует с антагонистической активностью. Критерии-пределы pH: менее 4,5 – антагонистически активные бифидобактерии; 4,6–5,1 – слабый антагонизм; более 5,1 – отсутствие антагонистической активности [11].

После 28 суток исследования выполнили забор биологического материала и проанализировали массы внутренних органов (сердце, легкие, почки, печень, селезенка, головной мозг) и висцерального жира для выявления потенциальных токсических или иных неблагоприятных эффектов исследуемых пищевых продуктов.

Статистическую обработку полученных данных проводили с использованием табличного процессора Microsoft Excel (Microsoft Office 2021; Microsoft, США), статистической программы

¹ Микробиологическая и молекулярно-генетическая оценка воздействия наноматериалов на представителей микробиоценоза: МУ 1.2.2634 10. М.: Федеральный Центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2010.

«Statistica 10» (StatSoft, США). Нормальность распределения определяли в тесте Шапиро–Уилка. Различия до и после введения штаммов оценивали парным критерий Wilcoxon Matched Pairs Test. Данные представлены в виде средней величины и стандартного отклонения ($M \pm SD$). Критический уровень значимости (p) при проверке статистических гипотез в данном исследовании принимается равным 0,05.

Результаты и их обсуждение. Во всех группах биомодели «младший школьный возраст» показатели роста и развития 48 крысят были следующими: масса тела – 54 ± 3 г; длина тела – 126 ± 3 мм. Через 28 суток масса тела животных на стандартном рационе вивария составила 159 ± 11 г; длина тела – 182 ± 7 мм. Дополнение к рациону сосисок приводило к возрастанию массы тела до 195 ± 27 г, увеличению длины тела до 197 ± 7 мм; после включения в питание котлет масса тела составила 199 ± 18 г, длина тела – 199 ± 7 мм. Высококалорийная диета сопровождалась ростом массы тела до 179 ± 12 мм; длина тела достигла всего 151 ± 13 мм. После замены высококалорийных добавок на сосиски масса тела возрастала до 173 ± 20 г, длина тела – до 179 ± 6 мм, а замена на котлеты корректировала последствия высококалорийной диеты в краткосрочном периоде следующим образом: масса тела составила 178 ± 17 г, длина тела – 179 ± 12 мм.

В биомодели «младший школьный возраст» у крысят на стандартном рационе питания индекс Ли составил 299; на фоне высококалорийной диеты – 375. При замене высококалорийных продуктов на низкокалорийные сосиски индекс Ли в группе 5 снизился до 312, а после замены на котлеты в группе 6 – до 315.

Анализ полученных данных показал, что у контрольных животных группы 1 на стандартном рационе вивария масса висцеральной жировой ткани составила $0,4 \pm 0,2$ г, в группе 3 после потребления сосисок – $0,6 \pm 0,2$ г, после включения в рацион питания котлет в группе 4 – $0,7 \pm 0,2$ г, в то время как при высококалорийной диете в группе 2 зафиксировали значительное повышение данного показателя до $1,9 \pm 0,6$ г ($p < 0,05$). После замены высококалорийной добавки к рациону крысят на низкокалорийные сосиски и котлеты отметили тенденцию к снижению массы висцерального жира до $1,4 \pm 0,5$ и $1,7 \pm 0,6$ г соответственно.

Согласно сведениям научной литературы и полученным данным, у крыс в группе с дополнением диеты высококалорийными продуктами прирост длины тела замедляется и накапливается висцеральный жир [7; 8; 10].

После потребления высококалорийной диеты в группе 2 отмечено статистически значимое возрастание изучаемых биохимических показателей, за исключением общего белка, альбумина и ЛПВП по сравнению с показателями группы контроля (табл. 1).

Т а б л и ц а 1. Биохимические показатели сыворотки крови крыс групп «младший школьный возраст» после 28 суток на различных рационах

Table 1. Biochemical indicators of blood serum in rats from the “early school age” groups after 28 days on different diets

Показатель, ед. изм. Indicator, unit of measurement	Группа Group					
	1	2	3	4	5	6
Общий белок, г/л	$48,7 \pm 1,3$	$49,2 \pm 2,5$	$48,8 \pm 1,4$	$48,1 \pm 1,2$	$49,0 \pm 1,1$	$48,5 \pm 2,5$
Альбумин, г/л	$34,2 \pm 2,3$	$30,8 \pm 2,2$	$34,1 \pm 2,1$	$34,8 \pm 1,7$	$32,1 \pm 1,8$	$33,7 \pm 1,6$
ТГ, ммоль/л	$0,9 \pm 0,2$	$6,1 \pm 1,0^*$	$1,1 \pm 0,1$	$1,0 \pm 0,2$	$3,6 \pm 0,9^{***}$	$4,0 \pm 2,0^{***}$
Глюкоза, ммоль/л	$3,6 \pm 0,4$	$6,3 \pm 0,6^*$	$3,7 \pm 1,1$	$3,8 \pm 0,5$	$4,8 \pm 1,0^{**}$	$6,0 \pm 0,6^*$
ОХС, ммоль/л	$2,0 \pm 0,4$	$12,3 \pm 2,8^*$	$2,1 \pm 0,3$	$2,2 \pm 0,3$	$7,0 \pm 2,3^{***}$	$8,3 \pm 2,8^{***}$
ЛПВП, ммоль/л	$1,0 \pm 0,1$	$1,0 \pm 0,1$	$0,9 \pm 0,1$	$0,9 \pm 0,2$	$1,0 \pm 0,1$	$0,9 \pm 0,1$
ЛПНП, ммоль/л	$1,0 \pm 0,2$	$2,8 \pm 0,5^*$	$0,9 \pm 0,1$	$1,1 \pm 0,1$	$2,8 \pm 0,9^*$	$2,7 \pm 1,0^*$
ИА, у. е.	1,1	4,1	1,2	1,2	2,1	2,9
Инсулин, пг/мл	179 ± 65	$4056 \pm 1600^*$	288 ± 95	350 ± 121	$518 \pm 111^{***}$	$667 \pm 134^{***}$
НОМА-IR, у. е.	1,1	33,1	1,5	2,4	3,9	5,4

П р и м е ч а н и я: * – $p < 0,05$ по отношению к показателям группы контроля, ** – $p < 0,05$ по отношению к показателям группы до изменения рациона.

N o t e s: * – $p < 0.05$ in relation to the indicators of the control group, ** – $p < 0.05$ in relation to the indicators of the group before the change in diet.

При анализе полученных данных, представленных в табл. 1, в группах 5 и 6 выявили повышенный уровень ТГ относительно контрольной группы 1, однако его количество снижалось относительно группы 2 (41 %; 34 %; $p < 0,05$); глюкоза значительно снизилась (24 %, $p < 0,05$) после введения сосисок в рацион питания экспериментальных животных группы 5, ранее находившихся на высококалорийном питании; концентрация ОХС также снижалась в обеих изучаемых группах (43 %; 33 %; $p < 0,05$) через 7 суток диеты.

Полученные данные свидетельствуют о серьезных нарушениях метаболизма, произошедших в организме крысят группы 2, находящихся на высококалорийной диете. Однако при смене рациона зафиксировали снижение повышенных биохимических показателей и тенденцию к восстановлению изучаемых параметров, что свидетельствует о том, что даже кратковременная диета приводит к положительной динамике и способствует восстановлению обмена веществ.

При оценке гематологических показателей установлено, что в группе 2 статистически значимо снижалось количество лейкоцитов, тромбоцитов, показатели гемоглобина, гематокрита, среднего объема эритроцитов, среднего содержания гемоглобина в эритроците, средней концентрации гемоглобина в эритроцитах, среднего объема тромбоцитов, зарегистрировали повышение тромбоцита (табл. 2).

Т а б л и ц а 2. Гематологические показатели крови крыс групп «младший школьный возраст» после 28 суток на различных рационах

Table 2. Hematological indicators of blood in rats from the “early school age” groups after 28 days on different diets

Показатель, ед. изм. Indicator, unit of measurement	Группа Group					
	1	2	3	4	5	6
WBC, $10^9/\text{л}$	$14,4 \pm 1,7$	$11,8 \pm 3,4^*$	$14,3 \pm 2,0$	$13,9 \pm 2,0$	$11,4 \pm 2,7^{**}$	$9,7 \pm 2,1^{**}$
RBC, $10^{12}/\text{л}$	$7,4 \pm 0,4$	$7,1 \pm 0,7$	$7,2 \pm 0,4$	$7,2 \pm 0,4$	$6,4 \pm 0,4^{**}$	$6,4 \pm 0,5^{**}$
HGB, г/л	$145,4 \pm 6,7$	$128,2 \pm 11,4^*$	$142,8 \pm 8,4$	$140,5 \pm 5,6$	$131,4 \pm 6,2^*$	$130,1 \pm 10,7^*$
HCT, %	$47,3 \pm 1,8$	$42,2 \pm 3,7^*$	$47,7 \pm 2,9$	$46,4 \pm 1,9$	$41,0 \pm 2,0^*$	$41,2 \pm 2,9^*$
MCV, фл	$63,8 \pm 2,8$	$59,7 \pm 2,7^*$	$66,2 \pm 1,6$	$65,1 \pm 2,4$	$64,4 \pm 2,3^{**}$	$64,3 \pm 2,2^{**}$
MCH, пг	$19,6 \pm 1,1$	$18,1 \pm 0,9^*$	$19,8 \pm 0,4$	$19,7 \pm 0,9$	$20,7 \pm 0,6^{**}$	$20,3 \pm 0,7^{**}$
MCHC, г/л	$307,5 \pm 5,1$	$303,2 \pm 4,1^*$	$299,4 \pm 2,8^*$	$302,5 \pm 3,6$	$320,8 \pm 4,9^{**}$	$315,8 \pm 8,5^{**}$
RDW-CV, %	$13,7 \pm 1,9$	$13,7 \pm 1,5$	$12,3 \pm 1,4$	$12,5 \pm 0,7$	$15,0 \pm 1,4$	$16,5 \pm 2,8^{**}$
PLT, $10^9/\text{л}$	913 ± 27	$1118 \pm 114^*$	937 ± 93	886 ± 92	$1069 \pm 81^*$	$1091 \pm 83^*$
MPV, фл	$5,0 \pm 0,3$	$5,7 \pm 0,3^*$	$5,5 \pm 0,2^*$	$5,6 \pm 0,6^*$	$5,9 \pm 0,3^{**}$	$6,5 \pm 0,5^{**}$
PDW, фл	$6,2 \pm 0,4$	$6,3 \pm 0,2$	$6,4 \pm 0,2$	$6,5 \pm 0,2$	$6,3 \pm 0,1$	$6,3 \pm 0,3$
PCT, %	$0,3 \pm 0,0$	$0,4 \pm 0,1^*$	$0,4 \pm 0,1^*$	$0,3 \pm 0,1$	$0,4 \pm 0,0^*$	$0,5 \pm 0,0^*$

Примечания: * – $p < 0,05$ по отношению к показателям группы контроля, ** – $p < 0,05$ по отношению к показателям группы до изменения рациона.

Notes: * – $p < 0.05$ in relation to the indicators of the control group, ** – $p < 0.05$ in relation to the indicators of the group before the change in diet.

После изменения высококалорийного рациона в группах 5 и 6 количество лейкоцитов, эритроцитов, уровень гемоглобина, гематокрита оставалось сниженным, однако количество тромбоцитов, показатели среднего объема тромбоцитов и тромбоцит повышались, что свидетельствует о положительной динамике процессов гемопоэза и реализации компенсаторных механизмов в ответ на анемию (табл. 2).

Следовательно, коррекция диеты в сторону уменьшения калорий, а не дополнение рациона системами, стимулирующими кроветворение, может оказаться более эффективной в долгосрочной перспективе терапии симптомов усталости, апатии и, как следствие, малой подвижности.

Таким образом, риск дальнейшего развития анемии нивелируется корректирующей диетой, а уровень гемоглобина и эритроцитов может служить дополнительным маркером алиментарных нарушений, не связанных с дефицитом железа.

Далее мы изучили влияние рациона питания на молочнокислые микроорганизмы кишечника. При оценке титра *Bifidobacterium* spp. отметили следующие закономерности: в группе 2 диет-индуцированного ожирения титр микроорганизмов снижался (26 %; $p < 0,05$) по отношению к показателям группы контроля (табл. 3).

Т а б л и ц а 3. Показатели молочнокислых микроорганизмов кишечника крыс групп «младший школьный возраст» после 28 суток на различных рационах, log (КОЕ/г)

Table 3. Indicators of lactic acid microorganisms in the intestines of rats from the “early school age” groups after 28 days on different diets, log (CFU/g)

Вид микроорганизма, log/(КОЕ/г) Type of microorganism, log (CFU/g)	Группа Group					
	1	2	3	4	5	6
<i>Bifidobacterium</i> spp.	10,6 ± 0,3	7,8 ± 0,6*	10,4 ± 0,7	10,4 ± 0,6	9,6 ± 0,2**	9,7 ± 0,1**
<i>Lactobacillus</i> spp.	10,5 ± 0,5	9,3 ± 0,6*	10,6 ± 1,5	10,9 ± 1,3	9,9 ± 0,8**	9,6 ± 0,3**

П р и м е ч а н и я: * – $p < 0,05$ по отношению к показателям группы контроля, ** – $p < 0,05$ по отношению к показателям группы до изменения рациона.

N o t e s: * – $p < 0,05$ in relation to the indicators of the control group, ** – $p < 0,05$ in relation to the indicators of the group before the change in diet.

После замены высококалорийной диеты на сосиски через 7 суток определили, что в группе 5 титр *Bifidobacterium* spp. возрастал на 23 % ($p < 0,05$) по сравнению с показателями до изменения рациона. В группе 6 также отметили рост титра микроорганизмов (24 %; $p < 0,05$; табл. 3).

Как видно из табл. 3, развитие диет-индуцированного ожирения сопровождается падением титра *Lactobacillus* spp. в группе 2 (11 %; $p < 0,05$) по сравнению с показателями группы контроля. После замены высококалорийной диеты на сосиски через 7 суток определили, что в группе 5 титр *Lactobacillus* spp. возрос (7 %; $p < 0,05$) по сравнению с показателями до изменения рациона. В группе 6 также отметили повышение титра изучаемых микроорганизмов (3 %; $p < 0,05$; табл. 3).

При оценке метаболической активности бифидобактерий по интенсивности кислотообразования в среде культивирования выявили следующие изменения: pH среды культивирования группы 1 менее 4,1 ед., в группе 2 – pH = 5,1 ед., в группе 3 – pH = 4,0 ед., в группе 4 – pH = 3,5 ед., в группе 5 – pH = 4,1 ед., в группе 6 – pH = 5,0 ед. Полученные данные свидетельствуют о том, что в контрольной группе присутствуют бифидобактерии с высоким уровнем метаболической активности, в то время как в группе высококалорийной диеты и в группе при замене высококалорийного продукта на котлеты присутствуют бактерии со слабым уровнем метаболической активности.

Таким образом, дополнение стандартного пищевого рациона новыми мясными продуктами и отсутствие в рационе высококалорийных продуктов не приводит к изменению титра бифидофлоры, однако замена высококалорийной диеты на сосиски позволяет повысить титр бифидобактерий за 7 суток по сравнению с группой «ожирение».

Суммируя вышеизложенное, можно сделать следующий вывод: введение в рацион новых мясных продуктов с пониженной калорийностью на биомодели «младший школьный возраст» не оказывает влияния на содержание молочнокислых микроорганизмов в кишечнике, в то время как диет-индуцированное ожирение сопровождается достоверным снижением титров молочнокислых бактерий. Наблюдаемый эффект снижения молочнокислых микроорганизмов при употреблении в пищу высококалорийных продуктов обусловлен избыточным поступлением жиров в организм, поскольку характер употребляемой пищи способствует снижению бифидо- и лактобактерий, приводит к хронической эндотоксемии и воспалительным процессам [8; 11; 12]. После замены высококалорийной диеты на новые мясные продукты, представленные сосисками и котлетами, в течение 7 суток зафиксировали повышение титра молочнокислых бактерий в сравнении с таковым в модели ожирения без добавления новых продуктов. Наблюдаемый эффект обусловлен составом мясного продукта: инулин, пищевые волокна и аскорбиновая кислота способствуют росту молочнокислых микроорганизмов и выступают в роли ростовых факторов. Для достижения позитивного эффекта можно рекомендовать более длительное их потребление, что в последующем позволит повысить титры молочнокислых бактерий и нормализовать микрофлору.

В тесте «Вис на горизонтальной струне» в модели ожирения у крысят зарегистрировали снижение выносливости в 2 раза по сравнению с группой контроля, что является следствием как повышения массы тела, так и снижения двигательной активности. Через 7 суток после перехода от высококалорийной диеты к экспериментальным мясным продуктам потребление сосисок и котлет позволило стабилизировать снижение времени удержания на горизонтальной струне, т. е.

незначительно улучшить. Поскольку потребление диеты с добавками новых мясных продуктов оказало стимулирующий эффект и повысило выносливость в среднем в 2,5 раза по сравнению с контрольными особями, сделали вывод о корректности зарегистрированной тенденции и целесообразности более длительного периода замещения высококалорийного рациона для оценки улучшения физиологических показателей работоспособности.

Двигательную и ориентировочную активность животных оценили и проанализировали при помощи теста «Приподнятый крестообразный лабиринт» (табл. 4).

Т а б л и ц а 4. Показатели двигательной и ориентировочной активности крыс в тесте «Приподнятый крестообразный лабиринт» после 28 суток на различных рационах

T a b l e 4. Indicators of motor and exploratory activity of rats in the “Elevated Plus Maze” test after 28 days on different diets

Показатель Indicator	Группа Group					
	1	2	3	4	5	6
Дистанция, м	9,9 ± 0,7	7,2 ± 1,0*	9,8 ± 0,5	11,3 ± 1,3		10,9 ± 0,5**
Время подвижности, с	260,3 ± 6,8	217,2 ± 15,7*	261,2 ± 12,3	253,1 ± 8,0	247,8 ± 10,9	265,8 ± 9,8**
Время неподвижности, с	39,7 ± 6,8	82,8 ± 15,7*	38,8 ± 12,3	46,9 ± 8,0	10,3 ± 0,8**	34,2 ± 9,8**
Кол-во эпизодов подвижности, ед.	4,5 ± 0,6	8,1 ± 1,0*	5,0 ± 0,9	5,9 ± 0,7	6,3 ± 0,8	4,5 ± 1,0**
Кол-во эпизодов неподвижности, ед.	4,0 ± 0,5	7,3 ± 1,0*	4,0 ± 0,9	5,1 ± 0,7	5,4 ± 0,8	3,5 ± 1,0**
Время активности, с	266,2 ± 6,3	225,3 ± 15,5*	274,7 ± 7,4	267,4 ± 5,7	265,6 ± 7,9**	280,1 ± 6,4**
Время неактивности, с	33,8 ± 6,3	74,7 ± 15,5*	25,3 ± 7,4	32,6 ± 5,7	34,4 ± 7,9**	19,9 ± 6,4**
Кол-во эпизодов активности, ед.	5,8 ± 0,9	9,1 ± 1,1*	5,3 ± 0,9	8,1 ± 0,9*↑	7,9 ± 0,8	5,2 ± 1,1**
Кол-во эпизодов неактивности, ед.	5,1 ± 0,8	8,1 ± 1,1*	4,5 ± 0,9	7,4 ± 0,9*↑	7,0 ± 0,9	4,2 ± 1,1**
Кол-во эпизодов замирания, ед.	50,0 ± 4,3	44,5 ± 3,4	68,1 ± 5,7*	56,1 ± 6,4	32,4 ± 5,5*	46,2 ± 3,9
Время замирания, с	46,5 ± 4,2	58,1 ± 9,0	81,5 ± 13,4*	65,9 ± 9,0	32,6 ± 8,2**	44,5 ± 6,3
Кол-во вертикализаций, ед.	15,0 ± 1,4	12,8 ± 2,7	13,6 ± 1,2	14,9 ± 1,8	13,0 ± 1,4	19,8 ± 0,6*
Время вертикализаций, с	19,7 ± 2,7	21,8 ± 4,3	19,5 ± 2,8	19,2 ± 3,8	19,2 ± 3,0	29,2 ± 2,4*
Кол-во актов груминга, ед.	0,9 ± 0,5	2,0 ± 1,2	2,1 ± 0,9	2,8 ± 0,8	5,3 ± 1,7*	3,5 ± 1,2
Длительность груминга, с	3,7 ± 2,3	6,5 ± 3,8	15,4 ± 9,0	12,8 ± 4,2*↑	25,2 ± 10,7	18,0 ± 7,3
Латентный период груминга, с	132,8 ± 8,8	141,8 ± 24,6	167,4 ± 37,3	105,0 ± 18,0	67,9 ± 10,0*	150,5 ± 30,9
Латентный период свешивания, с	35,2 ± 10,6	69,5 ± 29,1	138,0 ± 37,0	86,8 ± 37,1	83,4 ± 30,6	54,7 ± 24,9
Входы в закрытые рукава, ед.	12,9 ± 1,0	9,8 ± 1,4	14,3 ± 1,9	11,9 ± 1,5	10,7 ± 1,6	12,2 ± 2,3
Время в закрытых рукавах, с	184,5 ± 17,2	198,3 ± 13,9	206,4 ± 16,1	175,5 ± 18,4	219,9 ± 12,3	199,1 ± 16,7
Дистанция в закрытых рукавах, м	7,4 ± 0,8	5,4 ± 0,6	7,6 ± 0,4	7,3 ± 0,7	7,6 ± 0,5**	7,6 ± 0,4**
Входы в открытые рукава, ед.	7,0 ± 1,1	7,1 ± 1,9	7,1 ± 1,4	10,1 ± 2,3	7,1 ± 1,3	8,3 ± 2,4
Время в открытых рукавах, с	39,7 ± 8,5	31,8 ± 9,3	25,7 ± 6,4	58,5 ± 16,8	35,2 ± 6,8	47,8 ± 17,5
Дистанция в открытых рукавах, м	0,9 ± 0,3	0,7 ± 0,3	0,6 ± 0,2	2,4 ± 1,0	1,4 ± 0,2	1,7 ± 0,7
Входы в центр, ед.	19,4 ± 1,7	16,5 ± 2,6	20,6 ± 3,0	20,4 ± 1,9	16,6 ± 2,3	19,5 ± 3,6
Время в центре, с	75,8 ± 11,0	69,9 ± 9,8	68,0 ± 12,5	66,0 ± 10,3	44,9 ± 6,0	53,2 ± 8,5
Дистанция в центре, м	1,5 ± 0,2	1,1 ± 0,2	1,6 ± 0,2	1,7 ± 0,1	1,4 ± 0,1	1,7 ± 0,2

П р и м е ч а н и я: * – $p < 0,05$ по отношению к показателям группы контроля, ** – $p < 0,05$ по отношению к показателям группы до изменения рациона.

N o t e s: * – $p < 0.05$ in relation to the indicators of the control group, ** – $p < 0.05$ in relation to the indicators of the group before the change in diet.

После анализа полученных данных зафиксировали снижение двигательной активности крыс группы 2 при развитии ожирения: сократились такие показатели, как пройденная дистанция (38 %; $p < 0,05$), время подвижности (17 %; $p < 0,05$) и активности (15 %; $p < 0,05$), значительно увеличилось время неподвижности (109 %; $p < 0,05$) и неактивности (121 %; $p < 0,05$), количество эпизодов подвижности (80 %; $p < 0,05$), неподвижности (83 %; $p < 0,05$), активности (57 %; $p < 0,05$) и неактивности (59 %; $p < 0,05$) по отношению к показателям контрольной группы.

Замена высококалорийной диеты сосисками характеризовалась следующими изменениями параметров, зарегистрированными в группе 5: увеличилась пройденная дистанция (43 %; $p < 0,05$), время активности (18 %; $p < 0,05$), дистанция в закрытых рукавах (41 %; $p < 0,05$), зна-

чительно возросло количество актов груминга (165 %; $p < 0,05$), снизилось время неактивности (54 %; $p < 0,05$) и латентный период груминга (52 %; $p < 0,05$), количество эпизодов (27 %; $p < 0,05$) и времени (44 %; $p < 0,05$) замирания по сравнению с показателями до изменения рациона.

Включение котлет в диету экспериментальной группы 6 приводило к увеличению пройденной дистанции (51 %; $p < 0,05$) и дистанции в закрытых рукавах (41 %; $p < 0,05$), времени подвижности (22 %; $p < 0,05$), активности (24 %; $p < 0,05$), количества (55 %; $p < 0,05$) и времени (34 %; $p < 0,05$) вертикализаций, снижению времени подвижности (59 %; $p < 0,05$) и неактивности (73 %; $p < 0,05$), количества эпизодов подвижности (45 %; $p < 0,05$), неподвижности (52 %; $p < 0,05$), активности (42 %; $p < 0,05$) и неактивности (48 %; $p < 0,05$) по сравнению с показателями до изменения рациона.

Таким образом, введение в рацион высококалорийных продуктов негативно сказывалось и изменяло тактику поведения экспериментальных животных, однако замена рациона на новые мясные продукты оказало позитивный эффект на реализацию ориентировочно-двигательных рефлексов. Учитывая, что показатели выносливости у таких крысят минимальны, сделали вывод о том, что слишком жирная и сладкая пища сопровождается не только нарушением липидного обмена, но и систем доставки кислорода ко всем тканям и органам активно развивающегося организма, что негативно сказывается не только на состоянии здоровья, но оказывает непосредственное влияние на поведение [13].

Зависимое пищевое поведение сопровождается формированием особых нервных центров в головном мозге, обеспечивающих доминанту [13]. Особенно опасно это в детском возрасте, когда ребенок не просто растет, а развивается, копирует, запечатлевает топографию привычек и рационов социального окружения.

При ожирении наблюдается нарушение мембранного и полостного этапов пищеварения. В норме бифидо- и лактобактерии представлены в относительно равных пропорциях. У пациентов с ожирением в структуре полезной микробиоты наблюдается существенный рост лактобактерий и дефицит бифидобактерий [7; 14]. Поэтому ожирение, диабет, сердечно-сосудистые заболевания и аллергия связаны не только с изменением микробиоты толстой кишки, но и с особенностями симбионтов тонкой кишки [14].

Адиipoциты, макрофаги жировой ткани и дисбиоз кишечника у людей с избыточной массой тела и ожирением приводят к секреции цитокинов и хемокинов, которые проникают через гематоэнцефалический барьер и могут стимулировать микроглию, которая, в свою очередь, также высвобождает провоспалительные цитокины, что приводит к хроническому нейровоспалению низкой степени тяжести и может быть важным фактором апоптотической передачи сигналов и гибели нейронов. Кроме того, значительная микроангиопатия, наблюдаемая на моделях крыс, может быть еще одним важным механизмом индукции апоптоза. Нейровоспаление при нейродегенеративных заболеваниях (таких как болезни Альцгеймера и Паркинсона) может быть сходным с таковым при метаболических заболеваниях, вызванных недостаточностью питания. Поэтому у лиц с ожирением отмечают снижение когнитивных функций [13].

Заключение. В настоящем исследовании на крысах Вистар установлено, что замена высококалорийного рациона на новые мясные продукты, предоставленные для проведения эксперимента, приводит не только к улучшению показателей биохимического и общего анализа крови, но и оказывает положительное влияние на подвижность, выносливость и поведение животных. Учитывая, что растущий организм очень быстро тратит энергию, идет непрерывное развитие структур головного мозга, крысят не ограничивали в подвижности, приручали к рукам, систематически проводили поведенческие тесты, что обеспечило нахождение экспериментальных животных в условиях обогащения окружающей среды и способствовало гармоничному развитию организма.

Полученные данные свидетельствуют о том, что важно не только выявить наличие проблемы раннего ожирения, но и вовремя начать использовать комплексный подход для нивелирования уже имеющихся патологических изменений, которые можно и нужно корректировать. Комплекс мероприятий должен включать в себя не только аппетитную, вкусную, полезную, разнообразную еду, но и адекватное повышение двигательной активности и познание окружающего мира в рамках возрастных особенностей, что в дальнейшем позволит не только изменить и повысить качество жизни, но и будет являться профилактикой развития заболеваний в более зрелом возрасте.

Список использованных источников

1. WHO European Regional Obesity Report 2022 // World Health Organization. Regional Office for Europe. – 2022. – URL: <https://iris.who.int/handle/10665/353747> (date of access: 20.10.2024).
2. Солнцева, А. В. Ожирение у детей: учеб.-метод. пособие / А. В. Солнцева. – Минск, 2019. – 24 с.
3. Predictors of visceral and subcutaneous adipose tissue and muscle density: The ShapeUp! Kids study / G. Maskarinec, Yu. Shvetsov, M. C. Wong [et al.] // *Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases*. – 2024. – Vol. 34, N 3. – P. 799–806. <https://doi.org/10.1016/j.numecd.2023.12.014>
4. Клинические рекомендации «Ожирение у детей» / В. А. Петеркова, О. Б. Безлепкина, Н. В. Болотова [и др.] // *Проблемы эндокринологии*. – 2021. – Т. 67, № 5. – С. 67–83. <https://doi.org/10.14341/probl12802>
5. Устинова, А. В. Функциональные продукты питания на мясной основе / А. В. Устинова, Н. Е. Белякина // *Все о мясе*. – 2010. – № 3. – С. 4–7.
6. Модификация модели неалкогольной жировой болезни печени у крыс при сочетании гиперкалорийной диеты и гиподинамии / А. В. Бунят, О. М. Спасенкова, В. Е. Карев [и др.] // *Разработка и регистрация лекарственных средств*. – 2021. – Т. 10, № 4–1. – С. 155–165.
7. Sadie-Van Gijzen, H. Rat models of diet-induced obesity and metabolic dysregulation: Current trends, shortcomings and considerations for future research / H. Sadie-Van Gijzen, L. Kotzé-Hörstmann // *Obesity Research and Clinical Practice*. – 2023. – Vol. 17, N 6. – P. 449–457. <https://doi.org/10.1016/j.orcp.2023.09.010>
8. Alemasi, A. Gut microbiota in the association between obesity and kidney function decline: a metagenomics-based study in a rat model / A. Alemasi, L. Gu, Y. Zhou // *Renal Failure*. – 2024. – Vol. 46, N 1. – Art. 2328320. <https://doi.org/10.1080/0886022X.2024.2328320>
9. Obesity related alterations in kidney function and plasma cytokines: Impact of sibutramine and diet in male Wistar rats / F. U. Agu, M. U. Elendu, H. K. Okechukwu [et al.] // *African Journal of Pharmacy and Pharmacology*. – 2022. – Vol. 16, N 10. – P. 161–172. <https://doi.org/10.5897/ajpp2022.5305>
10. Komada, M. Elevated plus maze for mice / M. Komada, K. Takao, T. Miyakawa // *Journal of Visualized Experiments*. – 2008. – Vol. 22. – P. 1–4. <https://doi.org/10.3791/1088-v>
11. Altered microbiome composition in individuals with fibromyalgia / A. Minerbi, E. Gonzalez, N. J. B. Brereton [et al.] // *PAIN*. – 2019. – Vol. 160, N 11. – P. 2589–2602. <https://doi.org/10.1097/j.pain.0000000000001640>
12. Reoxygenation mitigates intermittent hypoxia-induced systemic inflammation and gut microbiota dysbiosis in high-fat diet-induced obese rats / M. Dong, X. Liang, T. Zhu [et al.] // *Nature and Science of Sleep*. – 2024. – Vol. 16. – P. 517–530. <https://doi.org/10.2147/nss.s454297>
13. Structural brain changes associated with overweight and obesity / E. Gómez-Apo, A. Mondragón-Maya, M. Ferrari-Díaz, J. Silva-Pereyra // *Journal of Obesity*. – 2021. – Art. 6613385. <https://doi.org/10.1155/2021/6613385>
14. Ляпина, М. В. Значение пристеночной микробиоты тонкой кишки в нарушении энтерального переваривания и всасывания при метаболическом синдроме / М. В. Ляпина, Я. М. Вахрушев // *Терапевтический архив*. – 2019. – Т. 91, № 11. – С. 37–42. <https://doi.org/10.26442/00403660.2019.11.000300>

References

1. WHO European Regional Obesity Report 2022. *World Health Organization. Regional Office for Europe*, 2022. Available at: <https://iris.who.int/handle/10665/353747> (accessed: 20 October 2024).
2. Solntseva A. V. *Obesity in Children: A Teaching Aid*. Minsk, 2019. 24 p. (in Russian).
3. Maskarinec G., Shvetsov Yu., Wong M. C., Cataldi D., Bennett J., Garber A. K., Buchthal S. D., Heymsfield S. B., Shepherd J. A. Predictors of visceral and subcutaneous adipose tissue and muscle density: The ShapeUp! Kids study. *Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases*, 2024, vol. 34, no. 3, pp. 799–806. <https://doi.org/10.1016/j.numecd.2023.12.014>
4. Peterkova V. A., Bezlepina O. B., Bolotova N. V., Bogova E. A., Vasyukova O. V., Girsh Ya. V., Kiyayev A. V., Kostrova I. B., Malievskiy O. A., Mikhailova E. G., Okorokov P. L., Petryaykina E. E., Taranushenko T. E., Khramova E. B. Clinical guidelines «Obesity in children». *Problemy endokrinologii = Problems of Endocrinology*, 2021, vol. 67, no. 5, pp. 67–83 (in Russian). <https://doi.org/10.14341/probl12802>
5. Ustinova A. V., Belyakina N. E. Meat-based functional foods. *Vse o myase* [All about meat], 2010, no. 3, pp. 4–7 (in Russian).
6. Bunyat A. V., Spasenkova O. M., Karev V. E., Karavaeva A. V., Ivkin D. J., Kulikov A. N., Okovityi S. V., Kirillova N. V. Modification of a model of non-alcoholic fat liver disease in rats with a combination of a hypercaloric diet and hypodynamia. *Razrabotka i registratsiya lekarstvennykh sredstv* [Drug development & registration], 2021, vol. 10, no. 4–1, pp. 155–165 (in Russian) [https://doi.org/10.33380/2305-2066-2021-10-4\(1\)-155-165](https://doi.org/10.33380/2305-2066-2021-10-4(1)-155-165)
7. Sadie-Van Gijzen H., Kotzé-Hörstmann L. Rat models of diet-induced obesity and metabolic dysregulation: Current trends, shortcomings and considerations for future research. *Obesity Research and Clinical Practice*, 2023, vol. 17, no. 6, pp. 449–457. <https://doi.org/10.1016/j.orcp.2023.09.010>
8. Alemasi A., Gu L., Zhou Y. Gut microbiota in the association between obesity and kidney function decline: a metagenomics-based study in a rat model. *Renal Failure*, 2024, vol. 46, no. 1, art. 2328320. <https://doi.org/10.1080/0886022X.2024.2328320>

9. Agu F. U., Elendu M. U., Okechukwu H. K., Mbah C. A., Obioha K. C., Abali I. O., Iyare E. E., Nwachukwu D. C. Obesity related alterations in kidney function and plasma cytokines: Impact of sibutramine and diet in male Wistar rats. *African Journal of Pharmacy and Pharmacology*, 2022, vol. 16, no. 10, pp. 161–172. <https://doi.org/10.5897/ajpp2022.5305>
10. Komada M., Takao K., Miyakawa T. Elevated plus maze for mice. *Journal of Visualized Experiments*, 2008, vol. 22, pp. 1–4. <https://doi.org/10.3791/1088-v>
11. Minerbi A., Gonzalez E., Brereton N. J. B., Anjarkouchian A., Dewar K., Fitzcharles M.-A., Chevalier S., Shir Y. Altered microbiome composition in individuals with fibromyalgia. *PAIN*, 2019, vol. 160, no. 11, pp. 2589–2602. <https://doi.org/10.1097/j.pain.0000000000001640>
12. Dong M., Liang X., Zhu T., Xu T., Xie L., Feng Y. Reoxygenation mitigates intermittent hypoxia-induced systemic inflammation and gut microbiota dysbiosis in high-fat diet-induced obese rats. *Nature and Science of Sleep*, 2024, vol. 16, pp. 517–530. <https://doi.org/10.2147/nss.s454297>
13. Structural Brain Changes Associated with Overweight and Obesity / E. Gómez-Apo, A. Mondragón-Maya, M. Ferrari-Díaz, J. Silva-Pereyra. *Journal of Obesity*, 2021, art. 6613385. <https://doi.org/10.1155/2021/6613385>
14. Lyapina M. V., Vakhrushev Ya. M. The value of mucosal small intestine microbiota in digestion and absorption disorders in metabolic syndrome. *Terapevticheskii arkhiv = Therapeutic Archive*, 2019, vol. 91, no. 11, pp. 37–42 (in Russian). <https://doi.org/10.26442/00403660.2019.11.000300>

Информация об авторах

Пашкевич Светлана Георгиевна – канд. биол. наук, доцент, заведующий Центром. Институт физиологии НАН Беларуси (ул. Академическая, 28, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: pashkevich@physiology.by.

Гордынец Светлана Анатольевна – канд. с.-х. наук, заведующий отделом. Институт мясо-молочной промышленности НПЦ НАН Беларуси по продовольствию (Партизанский просп., 172, 220075, Минск, Республика Беларусь). E-mail: otpm210@mail.ru.

Чернявская Лилия Александровна – канд. техн. наук, доцент, заведующий сектором. Институт мясо-молочной промышленности НПЦ НАН Беларуси по продовольствию (Партизанский просп., 172, 220075, Минск, Республика Беларусь). E-mail: otpm210@mail.ru.

Кусонская Татьяна Васильевна – науч. сотрудник. Институт мясо-молочной промышленности НПЦ НАН Беларуси по продовольствию (Партизанский просп., 172, 220075, Минск, Республика Беларусь). E-mail: otpm210@mail.ru.

Тихонович Ольга Геннадьевна – канд. биол. наук, доцент, вед. науч. сотрудник. Институт физиологии НАН Беларуси (ул. Академическая, 28, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: tixon-ol@mail.ru.

Пыж Анна Эдуардовна – канд. биол. наук, ст. науч. сотрудник. Институт физиологии НАН Беларуси (ул. Академическая, 28, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: viola_25@mail.ru.

Гладкова Жанна Анатольевна – канд. биол. наук, доцент, ст. науч. сотрудник. Институт физиологии НАН Беларуси (ул. Академическая, 28, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: gladkova_z@mail.ru.

Соболева Ольга Евгеньевна – науч. сотрудник. Институт физиологии НАН Беларуси (ул. Академическая, 28, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: soboleva@physiology.by.

Демина Яна Денисовна – мл. науч. сотрудник. Институт физиологии НАН Беларуси (ул. Академическая, 28, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: dyomina_2001@list.ru.

Ксенович Юлия Витальевна – мл. науч. сотрудник. Институт физиологии НАН Беларуси (ул. Академическая, 28, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: juksenevich@mail.ru.

Information about the authors

Pashkevich Svetlana G. – Ph. D. (Biology), Head of Centre. Institute of Physiology of the National Academy of Sciences of Belarus (28, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: skypasht@mail.ru.

Gordynets Svetlana A. – Ph. D. (Agrarian), Head of the Department. Institute of Meat and Dairy Industry Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Food (172, Partizansky Ave., 220075, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: otpm210@mail.ru.

Chernyavskaya Lilia A. – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Head of the Sector. Institute of Meat and Dairy Industry Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Food (172, Partizansky Ave., 220075, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: otpm210@mail.ru.

Kusonskaya Tatsiana V. – Researcher. Institute of Meat and Dairy Industry Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Food (172, Partizansky Ave., 220075, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: otpm210@mail.ru.

Tikhonovich Olga G. – Ph. D. (Biology), Associate Professor, Leading Researcher. Institute of Physiology of the National Academy of Sciences of Belarus (28, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: tixonol@mail.ru.

Pyzh Anna E. – Ph. D. (Biology), Senior Researcher. Institute of Physiology of the National Academy of Sciences of Belarus (28, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: viola_25@mail.ru.

Gladkova Zhanna A. – Ph. D. (Biology), Associate Professor, Senior Researcher. Institute of Physiology of the National Academy of Sciences of Belarus (28, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: gladkova_z@mail.ru.

Soboleva Olga E. – Researcher. Institute of Physiology of the National Academy of Sciences of Belarus (28, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: soboleva@physiology.by.

Demina Yana D. – Junior Researcher. Institute of Physiology of the National Academy of Sciences of Belarus (28, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dyomina_2001@list.ru.

Волков Арсений Владимирович – стажер мл. науч. сотрудника. Институт физиологии НАН Беларуси (ул. Академическая, 28, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: av.volkov.phys@mail.ru.

Токальчик Дмитрий Павлович – науч. сотрудник. Институт физиологии НАН Беларуси (ул. Академическая, 28, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: fossil1991@mail.ru.

Сердюченко Николай Сергеевич – член-корреспондент, д-р мед. наук, профессор.

Ksenevich Julia V. – Junior Researcher. Institute of Physiology of the National Academy of Sciences of Belarus (28, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: juksenevich@mail.ru.

Volkov Arseniy V. – Intern, Junior Researcher. Institute of Physiology of the National Academy of Sciences of Belarus (28, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: av.volkov.phys@mail.ru.

Tokalchik Dmitry P. – Researcher. Institute of Physiology of the National Academy of Sciences of Belarus (28, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: fossil1991@mail.ru.

Serdyuchenko Nikolai S. – Corresponding Member, D. Sc. (Medicine), Professor.

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ
TECHNICAL SCIENCES

УДК 519.23; 62-73

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2025-69-3-234-241>

Поступило в редакцию 05.11.2024

Received 05.11.2024

Р. А. Кусин¹, М. М. Дечко², И. Н. Черняк¹, А. Р. Кусин², Н. В. Рутковская³¹*Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа,
Минск, Республика Беларусь*²*ОАО «ЛМЗ Универсал», Солигорск, Республика Беларусь*³*Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск, Республика Беларусь***ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ФИЛЬТРОВ С ОРТОТРОПНОЙ СТРУКТУРОЙ
НА ОСНОВЕ ТКАНЫХ СЕТОК ПРИ ОГРАНИЧЕННЫХ ВОЗМОЖНОСТЯХ
ВАРЬИРОВАНИЯ УПРАВЛЯЮЩИМИ ФАКТОРАМИ***(Представлено академиком А. Ф. Ильющенко)*

Аннотация. В технике для очистки газов и жидкостей от твердых включений широко применяются сетчатые фильтрующие материалы, имеющие ряд достоинств: высокие прочность, проницаемость и термостойкость, способность к многократной регенерации. Однако их существенным недостатком является невысокая грязеемкость и, соответственно, ресурс работы до регенерации. При этом процесс регенерации затруднен, полностью удалить все застрявшие в ячейках частицы загрязнений не удастся, сами ячейки подвержены деформации. Указанных недостатков лишен фильтрующий материал на основе тканых сеток (ФМТС) с ортотропной структурой. ФМТС имеет повышенную грязеемкость, так как работает в режиме глубинного фильтрования. Кроме того, щелевые каналы, в которых задерживаются частицы загрязнителя, могут быть полностью очищены в процессе регенерации с разборкой фильтра, т. е. ФМТС имеет практически неограниченный ресурс работы. Утилизация ФМТС может осуществляться наиболее предпочтительным методом – путем повторного использования материальных ресурсов, что исключает экологические проблемы при переработке. Рациональное проектирование изделий из ФМТС основано на установлении взаимосвязи между параметрами структуры и свойствами материала. В представленной работе решена задача прогнозирования и оптимизации эксплуатационных свойств ФМТС на основе математических моделей взаимосвязи структурных параметров с технологическими характеристиками и свойствами при ограниченных возможностях варьирования управляющими факторами.

Ключевые слова: фильтрующий материал, тканые сетки, ортотропная структура, математико-стохастическая модель, планирование экспериментов

Для цитирования. Оптимизация конструкции фильтров с ортотропной структурой на основе тканых сеток при ограниченных возможностях варьирования управляющими факторами / Р. А. Кусин, М. М. Дечко, И. Н. Черняк [и др.] // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2025. – Т. 69, № 3. – С. 234–241. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2025-69-3-234-241>

Ruslan A. Kusin¹, Mikhail M. Dechko², Iryna M. Charniak¹, Aleksey R. Kusin², Nataliya V. Rutkovskaya³¹*O. V. Roman Powder Metallurgy Institute, Minsk, Republic of Belarus*²*JSC “LMZ Universal”, Soligorsk, Republic of Belarus*³*Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Republic of Belarus***OPTIMIZATION OF THE DESIGN OF FILTERS WITH ORTHOTROPIC STRUCTURE ON THE BASIS
OF WOVEN MESHES AT LIMITED POSSIBILITIES OF CONTROL FACTORS VARIATION***(Communicated by Academician Aliaksandr Ph. Ilyushchanka)*

Abstract. Mesh filter materials are widely used in the filtration of gases and liquids solid inclusions, exhibiting numerous advantages, including high strength, permeability, and heat resistance, as well as the capacity for multiple regeneration. However, a notable disadvantage is their limited dirt capacity, which consequently results in a reduced service life prior to re-

generation. Simultaneously, the regeneration process is challenging. It is not feasible to entirely eliminate all the dirt particles that have become embedded within the cells. Additionally, the cells themselves are susceptible to deformation. The filtering material with orthotropic structure on the basis of woven meshes (FMWM), consisting of woven meshes package, is devoid of these disadvantages. The FMWM demonstrates superior dirt capacity due to its operation in depth filter mode. Furthermore, the channels where the pollutant particles are retained can be completely cleaned during the regeneration process with the filter disassembly. In summary, FMWM possesses a practically infinite operational lifespan. The most preferred method for recycling FMWM is by reusing material resources, a practice that eliminates environmental problems during processing. The rational design of FMWM products is based on establishing a relationship between structural parameters and material properties. In the presented work, the problem of forecasting and FMWM performance properties optimization on the basis of mathematical models of the structural parameters' relationship with technological characteristics and properties at limited variation possibilities by controlling factors is solved.

Keywords: filtering material, woven meshes, orthotropic structure, mathematical-stochastic model, experiments' planning

For citations. Kusin R. A., Dechko M. M., Charniak I. M., Kusin A. R., Rutkovskaya N. V. Optimization of the design of filters with orthotropic structure on the basis of woven meshes at limited possibilities of control factors variation. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2025, vol. 69, no. 3, pp. 234–241 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2025-69-3-234-241>

Введение. Для очистки газов и жидкостей от твердых механических примесей как в бытовых, так и в промышленных системах достаточно широко применяются сетчатые фильтрующие материалы (СФМ), имеющие ряд достоинств, обусловленных сочетанием высокой прочности и проницаемости, высокой термостойкостью, способностью к многократной регенерации [1]. Недостатком СФМ является их невысокая грязеемкость, сокращающая ресурс работы до регенерации. Процесс регенерации СФМ затруднен, полностью удалить из ячеек все частицы загрязнений проблематично, сами ячейки подвержены деформации. Фильтрующий материал с ортотропной структурой (ФМТС), состоящий из пакета тканых сеток, в значительной степени лишен указанных недостатков¹. Поток очищаемой среды в процессе эксплуатации ФМТС направляется параллельно ячейкам, а выходит в перпендикулярном направлении по отношению к первоначальному (через ячейки), что повышает грязеемкость, так как фильтрующий материал работает в режиме глубинного фильтрования; при этом тонкость очистки фильтрующего материала определяется размерами щелей между слоями сеток, а не размерами их ячеек. Очевидно, что щелевые каналы, в которых задерживаются частицы загрязнителя, могут быть полностью очищены в процессе регенерации с разборкой фильтра. Это объясняется тем, что контур этих каналов при разборке становится полностью разомкнутым, что обеспечивает практически неограниченный ресурс работы ФМТС. Однако переориентация потока очищаемой среды и уменьшение размера фильтрующих каналов в поперечном направлении пакета снижает производительность процесса. Рациональное проектирование изделий фильтрующего назначения из ФМТС направлено на поиск компромиссного сочетания тонкости очистки и производительности. Известно, что использование математико-статистических методов при решении различных задач научных исследований позволяет существенно сократить трудоемкость экспериментов, снизить материальные затраты на их проведение и повысить качество полученных результатов [2; 3].

Математическое моделирование процесса получения ФМТС путем построения детерминированной модели, основанной на определении физических закономерностей, описывающих происходящие при этом явления, является очень сложной задачей. Это обусловлено дискретностью параметров исходных материалов – тканых сеток, производимых промышленностью, т. е. существующими ограничениями при варьировании управляющими факторами. Даже если полагаться на современные программные комплексы, например, ANSYS – многоцелевой пакет программ для численного моделирования физических процессов и явлений в области прочности, динамики жидкостей и газов, теплофизики и пр. [4], – решение задачи поиска оптимальных режимов технологического процесса является сложной проблемой. Реальная альтернатива для ее реше-

¹ Пат. 4811 Респ. Беларусь, МПК 7 В 01D 29/44. Щелевой фильтр: заявлено 29.06.1998: опубл. 30.12.2002 / Витязь П. А., Кусин Р. А., Валькович И. В., Капцевич В. М., Круглей В. П.; заявители ГНУ и БГАТУ; Пат. РБ № 949 Респ. Беларусь. У. В 01D 29/00. Композиционный фильтр: заявлено 18.12.2002: опубл. 30.09.2003 / Капцевич В. М., Крутов А. В., Корнеева В. К., Азаров Г. А., Кусин Р. А., Бокань Г. А., Лыков И. Ю., Кусин А. Р.; заявители ГНУ ИПМ, БГАТУ.

ния – методология стохастического моделирования, основанная на построении математических моделей методами математической статистики на основе экспериментальных данных [5].

Цель работы – на примере ФМТС с применением методов математического планирования предложить алгоритм оптимизации свойств разрабатываемых изделий при ограниченных возможностях варьирования факторами.

Материалы и методы исследования. Планируемое исследование направлено на поиск оптимальной конструкции фильтра, представляющего собой пакет сеток, образованных ортогональным переплетением волокон (рис. 1). Пакетирование выполняется наложением сеток друг на друга (рис. 2), фильтруемый поток подается на фильтр вдоль волокон.

В качестве исходного материала использован комплект сеток стандартного плетения, характеризуемый диаметром волокна d (мм) и размером ячейки на просвет l (мм) (табл. 1). Как видно из таблицы в стандартных сетках исключена возможность независимого варьирования диаметра волокна и размера ячейки. Более того, наблюдается достаточно тесная взаимосвязь этих двух факторов. Поэтому для построения матрицы планирования эксперимента, которая исключит взаимозависимость факторов d и l , целесообразно ввести качественный (категориальный) фактор «тип сетки», имеющий 9 фиксированных уровней, определяемых различными диаметрами волокна и размерами ячейки.

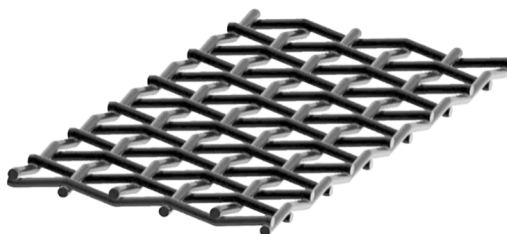


Рис. 1. Конфигурация тканой сетки

Fig. 1. Woven mesh configuration

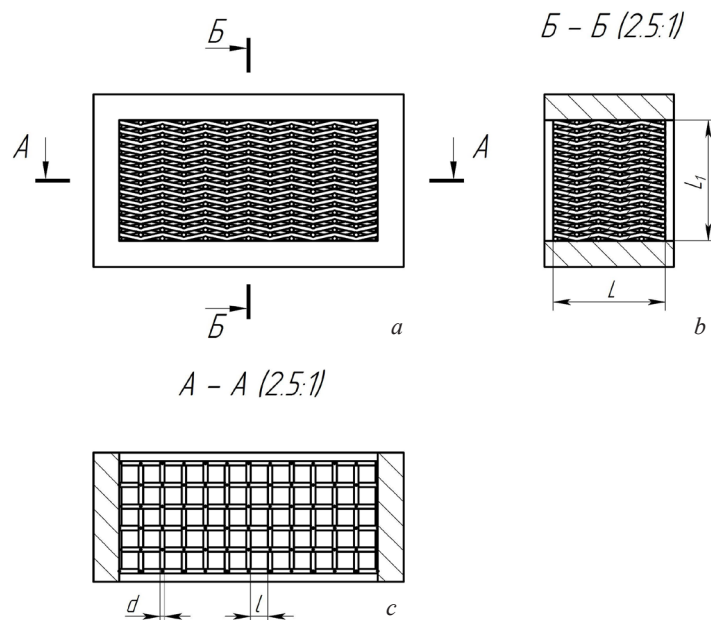


Рис. 2. Экспериментальный образец ФМТС: a – продольное сечение образца А–А (2,5 : 1); b – поперечное сечение образца Б–Б (2,5 : 1); c – вид сверху. d – диаметр волокна (мм); l – размер ячейки на просвет (мм); L – толщина пакета (мм); L_1 – ширина поперечного сечения (мм)

Fig. 2. FMTS experimental sample: a – longitudinal sample section А–А (2.5 : 1); b – cross sample section Б–Б (2.5 : 1); c – top view. d – fibre diameter (mm); l – mesh size per lumen (mm); L – packet thickness (mm); L_1 – cross-section width (mm)

Т а б л и ц а 1. Параметры стандартных сеток

T a b l e 1. Standard meshes parameters

Параметр Parameter	Тип Type								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Диаметр волокна, d , мм	0,063	0,125	0,22	0,25	0,25	0,5	0,5	1,0	2,0
Размер ячейки на просвет l , мм	0,1	0,2	0,415	0,63	1,0	2,0	3,2	10,0	5,0

Толщина пакета L для сохранения целостности сетчатой структуры должна быть кратна количеству ячеек. Этот количественный фактор фактически является целочисленным и в эксперименте варьируется в условно непрерывном диапазоне. Таким образом, при построении стохастической математической модели для описания свойств фильтра может быть выбрано только два фактора, характеризующих фильтр:

1) тип сетки – качественный (категориальный) фактор, имеющий 9 фиксированных уровней (табл. 1);

2) толщина пакета L – количественный фактор, кратный целому числу ячеек для фильтра каждого типа.

В качестве конфликтующих параметров оптимизации, характеризующих эксплуатационные свойства ФМТС, выбраны размер пор d_{cp} , мкм, определяющий тонкость очистки, и коэффициент проницаемости K , $\text{м}^2 \cdot 10^{-13}$, определяющий производительность фильтрации.

Для построения плана эксперимента используется сигма-ограниченная параметризация. На основе точного определения общие линейные модели используются для анализа планов эффектов категориальных предикторов, которые закодированы каким-либо методом. В большинстве случаев использования общих линейных моделей методом параметризации категориальных предикторов может либо сигма-ограниченный метод, либо перепараметризованный. Выбор перепараметризованной модели в качестве параметризации обладает существенным недостатком: эффекты низких порядков категориальных предикторов вместе с эффектами высокого порядка, содержащими взаимодействия, будут избыточными, что может привести к резкой потере качества оценивания. Поэтому мы будем использовать сигма-ограниченный метод, который заменяет 9-уровневый фактор «тип сетки» на комбинацию из двух ортогональных трехуровневых факторов (табл. 2). Для расчета коэффициентов модели реализован эксперимент, матрица плана которого представлена в табл. 3.

Т а б л и ц а 2. Параметризация типа сетки

T a b l e 2. Mesh type parameterisation

	Номер образца Sample number								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$X_1^{(1)}$	–1	0	1	–1	0	1	–1	0	1
$X_1^{(2)}$	–1	–1	–1	0	0	0	1	1	1

Т а б л и ц а 3. Результаты исследования и расчетные значения параметров

T a b l e 3. Results and calculated parameters values

№ опыта Experiment No.	Натуральные значения факторов Natural values of factors				Кодированные значения факторов Coded values of factors			Размер пор, d_{cp} , мкм Pore size, d_{cp} , μm		Коэффициент проницаемости, K , $\text{м}^2 \cdot 10^{-13}$ Permeability coefficient, K , $\text{м}^2 \cdot 10^{-13}$	
	Диаметр волокна, d , мм Fiber diameter, d , mm	Размер ячейки, l , мм Cell size, l , mm	Тип Type	Толщина материала, L , шт. Material thickness, L , pcs.	$X_1^{(1)}$	$X_1^{(2)}$	X_2	Эксп. Exp.	Расч. Calc.	Эксп. Exp.	Расч. Calc.
1	0,063	0,1	1	5	–1	–1	–0,579	32	32,3	120	120,6
2	0,063	0,1	1	10	–1	–1	–0,053	32	31,6	118	117,1
3	0,063	0,1	1	20	–1	–1	1	30	30,1	110	110,3

Окончание табл. 3

№ опыта Experiment No.	Натуральные значения факторов Natural values of factors				Кодированные значения факторов Coded values of factors			Размер пор, d_{cp} , мкм Pore size, d_{cp} , μm		Коэффициент проницаемости, K , $m^2 \cdot 10^{13}$ Permeability coefficient, K , $m^2 \cdot 10^{13}$	
	Диаметр волокна, d , мм Fiber diameter, d , mm	Размер ячейки, l , мм Cell size, l , mm	Тип Type	Толщина материала, L , шт. Material thickness, L , pcs.	$X_1^{(1)}$	$X_1^{(2)}$	X_2	Эксп. Exp.	Расч. Calc.	Эксп. Exp.	Расч. Calc.
4	0,125	0,2	2	5	0	–1	–0,579	50	49,4	170	168,1
5	0,125	0,2	2	10	0	–1	–0,053	48	48,9	164	166,8
6	0,125	0,2	2	20	0	–1	1	48	47,7	165	164,1
7	0,22	0,415	3	5	1	–1	–0,579	75	75,6	570	588,8
8	0,22	0,415	3	10	1	–1	–0,053	74	73,1	564	535,7
9	0,22	0,415	3	20	1	–1	1	68	68,3	420	429,4
10	0,25	0,63	4	5	–1	0	–0,579	78	78,0	690	690,0
11	0,25	0,63	4	10	–1	0	–0,053	70	70,0	605	605,0
12	0,25	1	5	5	0	0	–0,579	108	108,0	1312	1312,0
13	0,25	1	5	10	0	0	–0,053	100	100,0	1255	1255,0
14	0,5	2	6	1	1	0	–1	114	114,0	2480	2480,0
15	0,5	2	6	3	1	0	–0,789	110	110,0	2400	2400,0
16	0,5	3,2	7	1	–1	1	–1	99	99,0	2300	2300,0
17	0,5	3,2	7	3	–1	1	–0,789	94	94,0	2200	2200,0
18	1,0	10	8	1	0	1	–1	210	210,0	3940	3940,0
19	1,0	10	8	3	0	1	–0,789	190	190,0	2780	2780,0
20	2,0	5	9	1	1	1	–1	480	480,0	6700	6700,0
21	2,0	5	9	3	1	1	–0,789	468	468,0	5940	5940,0

В качестве модели, описывающей искомую зависимость, принимается общая линейная по параметрам модель от двух главных факторов, их взаимодействия и квадратичного эффекта количественного фактора Y :

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^9 b_1^{(i-1)} X_1^{(i-1)} + b_2 X_2 + \sum_{i=1}^9 b_{12}^{(i-1)} X_1^{(i-1)} X_2 + b_{22} X_2^2, \quad (1)$$

где b – коэффициенты регрессии и ковариации; $X_1^{(i-1)}$ – i -тип сетки, $i = 1 \dots 9$; X_2 – толщина материала, кратная целому числу ячеек фильтра, нормированная на отрезке ± 1 .

Оба параметра по своей физической природе могут принимать только положительные значения, поэтому для построения регрессионных моделей использованы логарифмические преобразования: $Y_1 = \ln(d_{cp})$ и $Y_2 = \ln(K)$.

Коэффициенты уравнения (1) рассчитывались в программе Statistica (TIBCO Software) с использованием процедуры обобщенной линейной модели регрессии методом пошагового исключения статистически незначимых коэффициентов. Полученные результаты представлены в табл. 4.

Т а б л и ц а 4. Коэффициенты регрессии для расчета параметров $\ln(d_{cp})$ и $\ln(K)$ по уравнению (1)

Table 4. Regression coefficients for parameters calculation $\ln(d_{mid})$ and $\ln(K)$ by equation (1)

Коэффициент Coefficient	Параметр Parameter	
	$\ln(d_{cp})$	$\ln(K)$
b_0	4,4782	6,6356
$b_1^{(1)}$	–1,0286	–1,8758
$b_1^{(2)}$	–0,5905	–1,5197
$b_1^{(3)}$	–0,1899	–0,3695
$b_1^{(4)}$	–0,2406	–0,2436
$b_1^{(5)}$	0,1192	0,4948

Окончание табл. 4

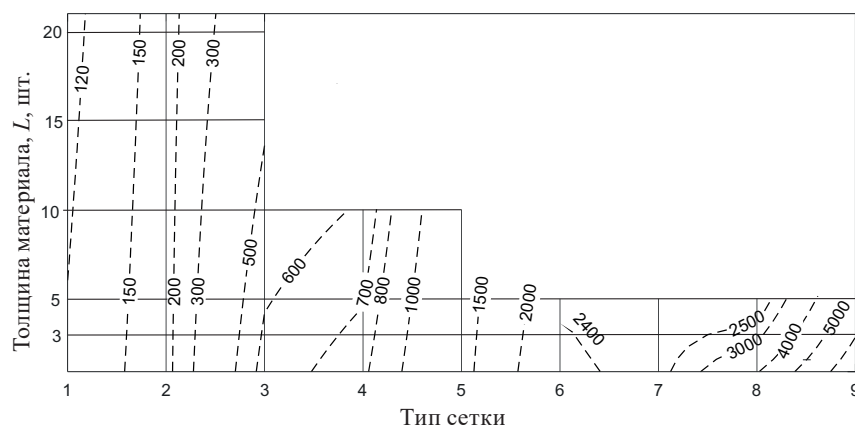
Коэффициент Coefficient	Параметр Parameter	
	$\ln(d_{cp})$	$\ln(K)$
$b_1^{(6)}$	0,0888	1,0250
$b_1^{(7)}$	−0,1287	0,8944
$b_1^{(8)}$	0,3946	незнач.
b_2	−0,1657	−0,3545
$b_{12}^{(1)}$	0,1224	0,2982
$b_{12}^{(2)}$	0,1431	0,3389
$b_{12}^{(3)}$	0,1017	0,1595
$b_{12}^{(4)}$	−0,0401	0,1046
$b_{12}^{(5)}$	0,0194	0,2701
$b_{12}^{(6)}$	незнач.	0,1991
$b_{12}^{(7)}$	−0,0799	0,1439
$b_{12}^{(8)}$	−0,3087	−1,2982
b_{22}	незнач.	незнач.

Результаты и их обсуждение. Для обоих параметров в логарифмических координатах квадратичный эффект количественного фактора – толщина материала L – статистически незначим в исследованном диапазоне, а его линейный эффект отрицательный. При этом значимые эффекты взаимодействия факторов показывают, что влияние толщины материала проявляется в различной степени для каждого типа ФМТС.

Для наглядного представления полученных зависимостей и их практического применения для прогнозирования эксплуатационных параметров ФМТС на основе стандартных сеток построены номограммы зависимостей исследованных параметров от варьируемых факторов (рис. 3, 4). «Пустые» области на графиках представляют диапазоны, в которых отсутствуют экспериментальные значения, а экстраполяция по уравнениям дает большую погрешность.

Между исследованными в данном эксперименте параметрами ФМТС K и d_{cp} наблюдается тесная положительная взаимосвязь (коэффициент парной корреляции 0,95). Поэтому отсутствует оптимальное решение, которое обеспечит одновременно высокую степень очистки при высокой проницаемости материала.

Представленные результаты исследований позволяют спрогнозировать основные эксплуатационные характеристики ФМТС, сконструированные из рассмотренных выше тканых сеток, а также провести оптимизацию получаемых изделий с целью достижения максимально возмож-

Рис. 3. Номограмма зависимости размера пор d_{cp} , мкм, ФМТС от типа материала и его толщиныFig. 3. Nomogram of pore size d_{mid} , μm , FMWM dependence on material type and its thickness

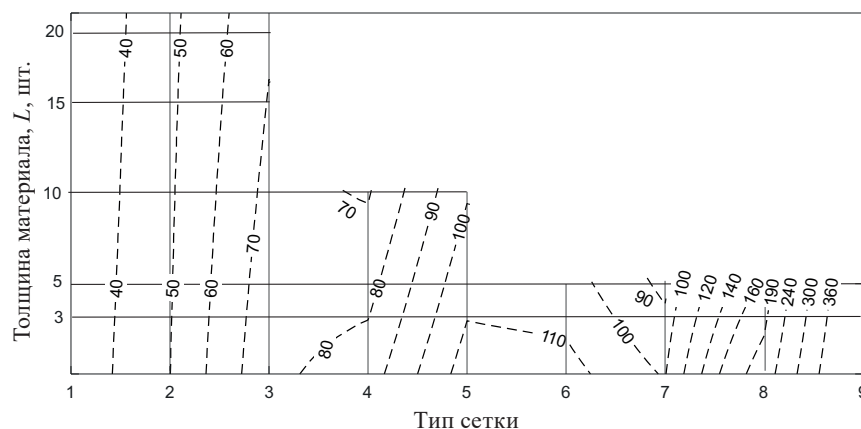


Рис. 4. Номограмма зависимости коэффициента проницаемости K , $\times 10^{-13}$, м^2 , ФМТС от типа материала и его толщины

Fig. 4. Nomogram of permeability coefficient K , $\times 10^{-13}$, m^2 , FMWM dependence on the material type and its thickness

ной пропускной способности при заданном размере пор. Например, при размере пор 94 мкм может быть рекомендовано использовать Тип 7, обеспечивающий получение ФМТС с максимальным значением коэффициента проницаемости ($2200 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2$).

Закключение. Выполнено экспериментальное исследование, направленное на поиск оптимальной конструкции сетчатого фильтра, представляющего собой пакет уложенных друг на друга сеток ФТМС. Построен план эксперимента с применением сигма-ограниченной параметризации, позволяющий варьировать в качестве управляющего фактора тип стандартных сеток. На основе данных, полученных по плану эксперимента, рассчитаны коэффициенты регрессии для размера пор $d_{\text{ср}}$, мкм, определяющие тонкость очистки, и коэффициент проницаемости K , $\times 10^{-13}$, м^2 , определяющий производительность фильтрации в зависимости от типа сетки и толщины материала. Для иллюстрации полученных зависимостей и практического использования при выборе ФМТС построены номограммы, которые позволяют прогнозировать эксплуатационные параметры. Представлен пример оптимизации эксплуатационных параметров ФТМС.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии» подпрограмма «Многофункциональные и композиционные материалы» задание 4.1.12.

Acknowledgements. The work was carried out with the financial support of the State Program of Scientific Research “Materials Science, New Materials and Technologies”, subprogram “Multifunctional and Composite Materials”, task 4.1.12.

Список использованных источников

1. Синельников, Ю. И. Пористые сетчатые материалы / Ю. И. Синельников. – М., 1983. – 64 с.
2. Новиков, А. М. Методология научного исследования / А. М. Новиков, Д. А. Новиков. – М., 2006. – 280 с.
3. Hoel, P. G. Introduction to Mathematical Statistics / P. G. Hoel. – 5th ed. – Wiley, 1984. – 448 p.
4. Основы работы в ANSYS 17 / Н. Н. Федорова, С. А. Вальгер, М. Н. Данилов, Ю. В. Захарова. – М., 2017. – 210 с.
5. Винарский, М. С. Планирование эксперимента в технологических исследованиях / М. С. Винарский, М. В. Лурье. – Киев, 1975. – 168 с.

References

1. Sinelnikov Yu. I. *Porous mesh material*. Moscow, 1983. 64 p. (in Russian).
2. Novikov A. M., Novikov D. A. *Scientific research methodology*. Moscow, 2006. 280 p. (in Russian).
3. Hoel P. G. *Introduction to Mathematical Statistics*. 5th ed. Wiley, 1984. 448 p.
4. Fedorova N. N., Valger S. A., Danilov M. N., Zakharova Yu. V. *The basics of working in a ANSYS 17*. Moscow, 2017. 210 p. (in Russian).
5. Vinarskiy M. S., Lurye M. V. *Experiment planning in technological research*. Kyiv, 1975. 168 p. (in Russian).

Информация об авторах

Кусин Руслан Анатольевич – канд. техн. наук, доцент, вед. науч. сотрудник. Институт порошковой металлургии им. акад. О. В. Романа (ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: nil23@pminstitute.by.

Черняк Ирина Николаевна – заведующий лабораторией. Институт порошковой металлургии им. акад. О. В. Романа (ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: nil23@pminstitute.by.

Дечко Михаил Михайлович – канд. техн. наук, доцент, инженер. Открытое акционерное общество «ЛМЗ Универсал» (ул. Заводская, 4, 223710, г. Солигорск, Минская обл., Республика Беларусь). E-mail: mdechko@rambler.ru.

Кусин Алексей Русланович – магистр техн. наук, науч. сотрудник. Институт порошковой металлургии им. акад. О. В. Романа (ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: nil23@pminstitute.by.

Рутковская Наталия Викторовна – ст. преподаватель, аспирант. Белорусский государственный аграрный технический университет (пр. Независимости, 99, 220012, Минск, Республика Беларусь). E-mail: rnatvikk@mail.ru.

Information about the authors

Kusin Ruslan A. – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Leading Researcher. O. V. Roman Powder Metallurgy Institute (41, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nil23@pminstitute.by.

Charniak Iryna M. – Head of the Laboratory. O. V. Roman Powder Metallurgy Institute (41, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nil23@pminstitute.by.

Dechko Mikhail M. – Ph. D. (Engineering), Professor, Engineer. JSC “LMZ Universal” (4, Zavodskaya Str., 223710, Soligorsk, Minsk region, Republic of Belarus). E-mail: mdechko@rambler.ru.

Kusin Aleksey R. – Master of Engineering Science, Researcher. O. V. Roman Powder Metallurgy Institute (41, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nil23@pminstitute.by.

Rutkovskaya Nataliya V. – Senior Lecturer, Postgraduate Student. Belarusian State Agrarian Technical University (99, Independence Ave., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: rnatvikk@mail.ru.

ISSN 1561-8323 (Print)

ISSN 2524-2431 (Online)

УДК 544.344.015.2+544.277.6

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2025-69-3-242-247>

Поступило в редакцию 25.11.2024

Received 25.11.2024

Е. С. Демух, академик О. Г. Пенязьков, С. П. Фисенко

*Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь***НЕИЗОТЕРМИЧЕСКАЯ НУКЛЕАЦИЯ И ФОРМИРОВАНИЕ КЛАСТЕРОВ SiO_2**

Аннотация. В работе представлены результаты моделирования процесса гомогенной нуклеации паров диоксида кремния с целью улучшения понимания особенности работы высокотемпературного стенда. Процесс нуклеации описан как результат тройного столкновения: двух молекул диоксида кремния и любой третьей молекулы в газовой смеси. Показано, что при больших пересыщениях пара нуклеация имеет существенно неизотермический характер. При этом формируется более 10^{21} кластеров/ м^3 . Выделение скрытой теплоты фазового перехода существенно, на сотни градусов Кельвина, повышает температуру газовой смеси. Обнаружено, что чем выше пересыщение пара, тем меньше квазистационарный радиус нанометровых кластеров. Этот эффект влияет на броуновское осаждение кластеров на подложку.

Ключевые слова: свободномолекулярный режим, температура кластеров, радиус кластеров, пересыщение пара, броуновская диффузия

Для цитирования. Демух, Е. С. Неизотермическая нуклеация и формирование кластеров SiO_2 / Е. С. Демух, О. Г. Пенязьков, С. П. Фисенко // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2025. – Т. 69, № 3. – С. 242–247. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2025-69-3-242-247>

Elena S. Demukh, Academician Oleg G. Penyazkov, Sergey P. Fisenko

*A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus***NONISOTHERMAL NUCLEATION AND FORMATION OF SiO_2 CLUSTERS**

Abstract. The paper presents the results of modeling the process of homogeneous nucleation of silicon dioxide vapors. The purpose of the modeling is to improve the understanding of the operating features of a high-temperature stand. The nucleation process is described as a result of a triple collision between two molecules of silicon dioxide and any third molecule in the gas mixture. It has been demonstrated that at high vapor supersaturations, nucleation exhibits a significantly non-isothermal character. The formation of more than 10^{21} clusters per cubic meter is observed. The release of latent heat of the phase transition significantly increases the temperature of the gas mixture (by hundreds of degrees Kelvin). It is found that the higher the vapor supersaturation, the smaller the quasi-steady radius of nanometer clusters. This effect influences the Brownian deposition of clusters on the substrate.

Keywords: free-molecular regime, cluster temperature, cluster radius, supersaturation vapor, Brownian diffusion

For citation. Demukh E. S., Penyazkov O. G., Fisenko S. P. Nonisothermal nucleation and formation of SiO_2 clusters. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2025, vol. 69, no. 3, pp. 242–247 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2025-69-3-242-247>

Введение. Экспериментальные результаты по осаждению на расплав наночастиц диоксида кремния, образовавшихся после нуклеации паров диоксида кремния, приведены в [1]. Показано, что эффективность осаждения достаточно низкая и зависит от материала прекурсора, доставляющего атомы кремния в реактор. Самое удивительное, что при увеличении производительности горелки для получения диоксида кремния эффективность осаждения наночастиц возрастает, независимо от вида используемого сырья (прекурсоров). В литературе нет объяснения этого эффекта, прямых измерений термодинамических параметров в зоне нуклеации нет. Отметим, что при одинаковых массовых расходах у обеих смесей газов, количество кремния, доставляемого в реактор газом прекурсора ОМСТС (химическая формула $[\text{SiO}(\text{CH}_3)_2]_4$), в 2,2 раза выше, чем SiCl_4 .

Представляется, что необычный эффект увеличения эффективности осаждения при увеличении подачи прекурсоров в горелку установки заслуживает отдельного изучения. Цель рабо-

ты – установить физический механизм, объясняющий увеличение осаждения наночастиц при увеличении производительности горелки.

Математическая модель формирования кластеров диоксида кремния. Для больших пересыщений пара диоксида кремния, высота термодинамического барьера для образования критического зародыша, связанная с вкладом поверхностной свободной энергии, весьма мала, около kT . При этом радиус критического зародыша, вычисленного по формуле Гиббса, существенно меньше 1 нм [2].

Для такого маленького термодинамического барьера процесс нуклеации с достаточной точностью можно описать как тройное столкновение: двух молекул диоксида кремния и любой третьей молекулы в газовой смеси. Число таких тройных столкновений в единицу времени в единичном объеме и определяет скорость нуклеации I [3]. В рамках этой модели скорость нуклеации I прямо пропорциональна полному давлению в системе. Кроме того, скорость нуклеации прямо пропорциональна квадрату плотности пара диоксида кремния. Выражение скорости нуклеации единице объема имеет вид

$$I = \frac{4\pi^2 n^2 P}{3kT} \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} r_c^5, \quad (1)$$

где P – полное давление в системе; n – числовая плотность молекул SiO_2 ; m – масса молекулы SiO_2 ; r_c – радиус сферы для расчета тройного столкновения; k – постоянная Больцмана. Величину r_c можно приближенно определить, используя среднее расстояние между молекулами в макроскопическом образце SiO_2 . Имеем

$$r_c = \left(\frac{3}{4\pi} \frac{\text{amu}(28+32)}{\rho_{\text{SiO}_2}} \right)^{1/3}, \quad (2)$$

где amu – атомная единица массы; ρ_{SiO_2} – массовая плотность макроскопического диоксида кремния. После простого расчета имеем из (2), что $r_c = 0,209$ нм.

Для приближенного расчета скорости нуклеации в сопле I_n можно использовать выражение

$$I_n = I\Omega,$$

где Ω – объем сопла для прокачки прекурсора и других газов.

Применение классической теории нуклеации Френкеля–Зельдовича [2] невозможно в случае больших пересыщений пара, так как размер критического зародыша настолько мал, что использование понятий поверхностного натяжения и химического потенциала для такого зародыша из 2 молекул мало обоснованно. В частности, расчет по формуле Гиббса радиуса критического зародыша дает величину менее 0,1 нм. При этом пересыщение пара S равно отношению

$$S = n / n_s(T),$$

$n_s(T)$ – числовая плотность насыщенного пара при температуре T [4].

Для нашей задачи математическая модель неизотермической нуклеации включает в себя уравнение для изменения радиуса зародыша, уравнение для изменения температуры зародыша, уравнение для изменения числа растущих кластеров в единице объема. В модель также входят уравнение для описания изменения плотности пара за счет гомогенной и гетерогенной конденсации и уравнения для изменения температуры пара за счет теплообмена с растущими кластерами. Взаимодействие молекул пара и молекул газа с кластерами идет при атмосферном давлении в свободномолекулярном режиме.

Уравнение для изменения числа кластеров N в единице объема имеет вид

$$\frac{dN}{dt} = I(T, n).$$

Начальное условие – $N(0) = 0$.

Уравнение для неизотермического роста кластера R в свободномолекулярном режиме имеет вид

$$\frac{dR}{dt} = \frac{mk^{0,5}}{\rho\sqrt{2\pi m}} \left[nT^{0,5} - n_s(T_d)T_d^{0,5} \right], \quad (3)$$

где m – масса молекулы диоксида кремния.

Начальное условие для $R(0) = 0,27$ нм.

Уравнение для расчета изменения температуры кластера за счет выделения скрытой теплоты фазового перехода и теплообмена с окружающим неконденсирующимся газом основано на законе сохранения энергии и имеет вид

$$\frac{dT_d}{dt} = \frac{3}{R} \left(-T_d \frac{dR}{dt} + \frac{A_{\text{air}} + A_v}{\rho c_l} \right), \quad (4)$$

где поток энергии между кластером и неконденсирующимся газом A_{air} равен

$$A_{\text{air}} = \left(\frac{P}{kT} - n \right) \sqrt{\frac{kT}{2\pi m_a}} (2,5k + 0,5k)(T - T_d).$$

И поток энергии между кластером и паром A_v записывается как

$$A_v = \sqrt{\frac{k}{2\pi m}} \left[nT^{0,5} (c_v T + 0,5kT + U) - n_s(T_d)T_d^{0,5} (c_v T_d + 0,5kT_d + U) \right].$$

В этом уравнении m – масса молекулы диоксида кремния; m_a – масса молекулы неконденсируемого газа; U и c_v – скрытая теплота фазового перехода и теплоемкость в расчете на одну молекулу соответственно.

Начальное условие для выражения (4) – $T_d(0) = T_0$.

Уравнение для расчета изменения плотности пара выражает закон сохранения молекул диоксида кремния и имеет вид

$$\frac{dn}{dt} = -4\pi R^2 N \frac{\rho}{m} \frac{dR}{dt}. \quad (5)$$

Начальное условие – $n(0) = n_0$.

Уравнение для изменения температуры пара выражает собой закон сохранения энергии и имеет вид

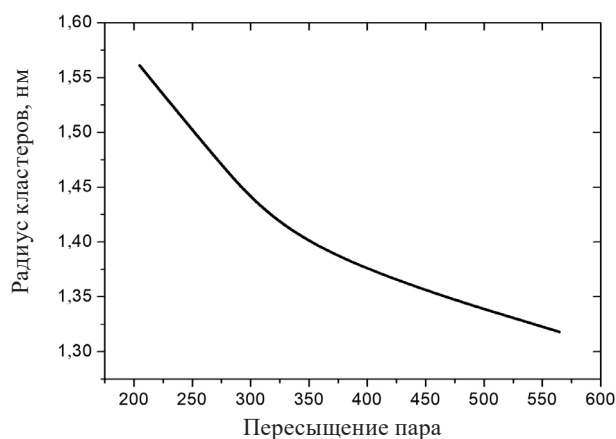
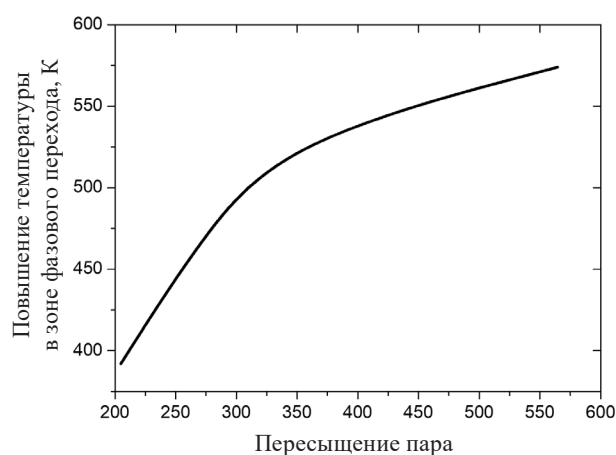
$$\frac{dT}{dt} = -\frac{4\pi R^2 N k T}{c_a P} (A_v + A_{\text{air}}) - T \frac{dn}{dt}. \quad (6)$$

Начальное условие для $T(0) = T_0 = 2400$ К.

Результаты численного моделирования. Система нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений (1)–(6) решалась с помощью программы Mathcad 15. Начальная температура газовой смеси для расчетов была принята 2400 К, начальная плотность n_0 изменялась в широких пределах в соответствии с изменением начального пересыщения. В качестве неконденсирующегося газа рассматривался азот. Результаты расчетов приведены на рис. 1–4.

На рис. 1 показаны значения финального (квазистационарного) радиуса кластера в зависимости от начального значения пересыщения пара при начальной температуре газовой смеси 2400 К. Эти значения радиусов достигаются примерно через 1 мкс после начала конденсации паров. Очевидно, что осаждение таких нанометровых кластеров из ламинарного потока идет с помощью броуновской диффузии.

На рис. 2 показаны результаты расчета отклонения квазистационарной температуры кластеров от начальной температуры. Отметим, что температура парогазовой смеси в зоне фазового перехода монотонно повышается и через примерно 1 мкс она практически совпадает с температурой кластеров.

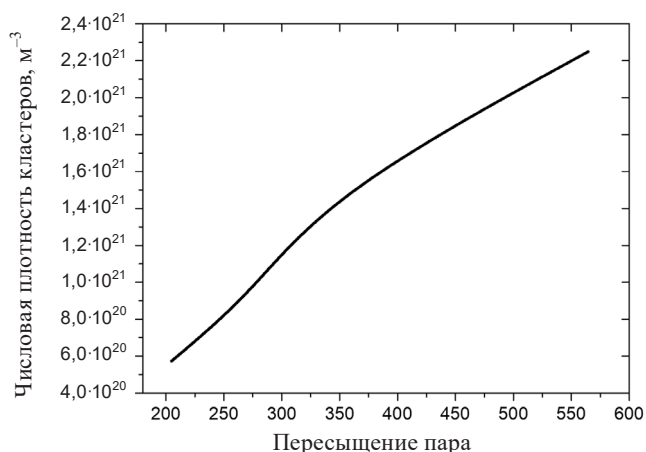
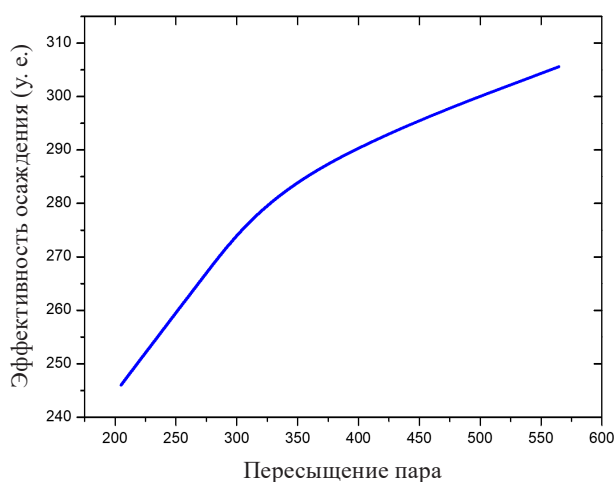
Рис. 1. Зависимость величины квазистационарного радиуса кластера от начального пересыщения S Fig. 1. Cluster radius vs initial supersaturation S Рис. 2. Зависимость нагрева парогазовой смеси в зоне конденсации от степени пересыщения пара S Fig. 2. Dependence heating of the gas-vapor mixture in the condensation zone vs of supersaturation S

Повышение температуры кластеров связано с выделением скрытой теплоты фазового перехода. Большая скорость теплообмена между кластерами и газом связана с большой числовой плотностью кластеров и свободномолекулярным режимом взаимодействия.

На рис. 3 показана зависимость числовой плотности кластеров от степени неравновесности (начального пересыщения) пара. Отметим, что пересыщение пара зависит от массового расхода питающего агента и его природы (рис. 1) и по мере образования большого числа кластеров пересыщение, как правило, падает. В нашем случае нагрев кластеров вызывает дополнительное испарение молекул диоксида кремния из кластеров в газовую фазу. Появление новых молекул пара ведет к увеличению скорости нуклеации. При таком быстром формировании и температуре кластеры диоксида кремния будут, как правило, жидкими аморфными образцами. Характерное время кристаллизации после охлаждения кластеров можно оценить как R^2 / D . Здесь D – коэффициент самодиффузии молекул диоксида кремния. Для кластера с радиусом 2 нм время кристаллизации составляет порядка 1 с, что намного больше длительности экспериментов в нашем Институте.

В [5] показано, что эффективность осаждения w наночастиц из параллельного подложке потока прямо пропорциональна корню квадратному из коэффициента броуновской диффузии D_b . Эффективность осаждения w поэтому ведет себя как

$$w \sim \frac{T^{3/4}}{R}.$$

Рис. 3. Зависимость числовой плотности кластеров от степени пересыщения пара S Fig. 3. The number density of clusters vs of supersaturation S Рис. 4. Эффективность осаждения кластеров w от степени пересыщения S Fig. 4. Clusters deposition efficiency w vs of supersaturation S

На рис. 4 показана эффективность осаждения (в условных единицах) кластеров на подложку при различных пересыщениях. Обратим внимание, что при относительно небольших пересыщениях пара эффективность осаждения линейно возрастает при увеличении пересыщения.

Заключение. Проведено численное моделирование гомогенной нуклеации паров диоксида кремния и роста кластеров. Показано, что при больших пересыщениях пара нуклеация имеет существенно неизотермический характер. Кинетика нуклеации определяется кинетикой тройных столкновений двух молекул диоксида кремния и любой газовой молекулы. В результате выделения скрытой теплоты фазового перехода температура кластеров существенно (сотни градусов) и быстро (~ 1 мкс) возрастает по сравнению с начальной температурой смеси. Этот эффект замедляет скорость увеличения радиуса кластеров из-за их частичного испарения.

В работе показано, что в силу быстрого формирования и высокой температуры кластеры диоксида кремния будут жидкими и аморфными.

Ранее было показано [5], что эффективность броуновского осаждения кластеров на подложку из газового потока прямо пропорциональна $\sqrt{D_b}$. Таким образом, полученные данные впервые позволяют объяснить экспериментально найденные ранее зависимости [1].

Экспериментальную верификацию наших результатов выполнить довольно трудно из-за пространственно-временных масштабов процессов. Тем не менее, целесообразно измерить тем-

пературу кластеров во время экспериментов с помощью фотоэмиссионного пирометра ПИФ 18 (разработка Института тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси). Так же было бы интересно оценить верхние размеры осаждаемых частиц с помощью рассеяния лазерного излучения.

Список использованных источников

1. Patent US5043002A, C03B37/01413. Method of making fused silica by decomposing siloxanes: No. 568230: filing date 16.08.1990: publ. date 27.08.1991 / Dobbins M. S., McLay R. E. – URL: <https://patents.google.com/patent/US5043002A/en>
2. Френкель, Я. И. Кинетическая теория жидкости / Я. И. Френкель. – М., 1975. – 592 с.
3. Model of aerosol evolution in high supersaturated glycerol-air vapor mixtures / S. P. Fisenko, A. A. Rostami, D. B. Kane [et al.] // *Aerosol Science and Technology*. – 2021. – Vol. 55, N 8. – P. 871–885. <https://doi.org/10.1080/02786826.2021.1904130>
4. Samsonov, G. V. *The Oxide Handbook* / G. V. Samsonov. – New York, 1973. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-9597-7>
5. Голомако, Е. С. Осаждение наночастиц и их агломератов из ламинарного газового потока на подложку / Е. С. Голомако, В. И. Саверченко, С. П. Фисенко // *Инженерно-физический журнал*. – 2024. – Т. 97, № 7. – С. 1818–1822.

References

1. Dobbins M. S., McLay R. E. Method of making fused silica by decomposing siloxanes: patent US5043002A. Publ date 27 August 1991. Available at: <https://patents.google.com/patent/US5043002A/en>
2. Frenkel Ya. I. *Kinetic theory of liquids*. Moscow, 1975. 592 p. (in Russian).
3. Fisenko S. P., Rostami A. A., Kane D. B., Pithawalla Y. B., Maximoff S. N., Li W., El- Shall M. S. Model of aerosol evolution in high supersaturated air-glycerol vapor mixtures. *Aerosol Science and Technology*, 2021, vol. 55, no. 8, pp. 871–885. <https://doi.org/10.1080/02786826.2021.1904130>
4. Samsonov G. V. *The Oxide Handbook*. New York, 1973. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-9597-7>
5. Golomako E. S., Saverchenko V. I., Fisenko S. P. Deposition of nanoparticles and their agglomerates from a laminar gas flow onto a substrate. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2024, vol. 97, pp. 1820–1824. <https://doi.org/10.1007/s10891-024-03063-1>

Информация об авторах

Демух Елена Сергеевна – мл. науч. сотрудник. Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: elena_demukh@hmti.ac.by.

Пенязков Олег Глебович – академик, д-р физ.-мат. наук, директор. Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: penyaz@dnpiitmo.by.

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

Information about the authors

Demukh Elena S. – Junior Researcher. A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: elena_demukh@hmti.ac.by.

Penyazkov Oleg G. – Academician, D. Sc. (Physics and Mathematics), Director. A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: penyaz@dnpiitmo.by.

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

СОЦИАЛЬНО-ГУМАНИТАРНЫЕ НАУКИ
SOCIAL SCIENCES AND HUMANITIESУДК [316.728:004]:303.425.2(476)
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2025-69-3-248-257>Поступило в редакцию 25.03.2025
Received 25.03.2025**О. В. Кобяк***Институт социологии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь***СОЦИАЛЬНЫЕ ФАКТОРЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
В ПОВСЕДНЕВНЫХ ПРАКТИКАХ НАСЕЛЕНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ:
ОПЫТ СОЦИОЛОГИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ***(Представлено академиком А. А. Коваленей)*

Аннотация. На основе результатов республиканского социологического исследования, проведенного Институтом социологии НАН Беларуси в 2024 г. при участии автора, выявлены основные социальные детерминанты распространения цифровых технологий в повседневных практиках жителей Беларуси: 1) новые возможности, облегчающие и ускоряющие рутинные операции, а также – упрощающие включение в образовательные процессы; 2) высокотехнологичные и гибкие формы занятости с существенно более комфортными условиями труда; 3) эффективные средства, помогающие в реализации самосохранительного поведения; 4) разнообразные и доступные формы свободной коммуникации; 5) удобные и быстрые способы получения многочисленных, в том числе финансовых, услуг. Такие надпрофессиональные навыки социальных субъектов, как навык переобучения, адаптативность, целеустремленность, самостоятельность и умение оценивать риски, составляют компетентностный фактор, обеспечивающий базовые разрешающие условия для освоения цифровых технологий.

Ключевые слова: цифровые технологии, повседневные практики, социальные факторы, социальные субъекты, стимуляционно-мотивационный механизм

Для цитирования. Кобяк, О. В. Социальные факторы распространения цифровых технологий в повседневных практиках населения Республики Беларусь: опыт социологического исследования / О. В. Кобяк // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2025. – Т. 69, № 3. – С. 248–257. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2025-69-3-248-257>

Aleh V. Kabiak*Institute of Sociology of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus***SOCIAL FACTORS OF DISTRIBUTION OF DIGITAL TECHNOLOGIES
IN THE EVERYDAY PRACTICES OF THE POPULATION OF THE REPUBLIC OF BELARUS:
EXPERIENCE OF SOCIOLOGICAL RESEARCH***(Communicated by Academician Alexander A. Kovalenya)*

Abstract. Based on the results of a republican sociological study conducted by the Institute of Sociology of the National Academy of Sciences of Belarus in 2024, in which the author participated, the main social determinants of the distribution of digital technologies in the everyday practices of residents of Belarus were identified: 1) new opportunities that facilitate and speed up routine operations, as well as simplifying inclusion in educational processes; 2) high-tech and flexible forms of employment with significantly more comfortable working conditions; 3) effective means to help implement self-preservation behavior; 4) diverse and accessible forms of free communication; 5) convenient and fast ways to receive numerous services, including financial ones. The aforementioned supra-professional skills of social subjects, including retraining skills, adaptability, determination, independence, and the ability to assess risks, constitute a competency factor that provides the basic enabling conditions for the development of digital technologies.

Keywords: digital technologies, everyday practices, social factors, social subjects, stimulation and motivational mechanism

For citation. Kabiak A. V. Social factors of distribution of digital technologies in the everyday practices of the population of the Republic of Belarus: experience of sociological research. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2025, vol. 69, no. 3, pp. 248–257 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2025-69-3-248-257>

Введение. В проекте концепции подпрограммы «Социология» Государственной программы научных исследований «Социально-экономическая и национально-культурная безопасность белорусской государственности» на 2026–2030 гг. в основу комплексного анализа процессов стабильного функционирования белорусского общества закладывается систематическое изучение социальной динамики в мониторинговом режиме, а также – технологии социологического прогнозирования, способствующие обеспечению социально-экономической и национально-культурной безопасности белорусской государственности в современных условиях. Повсеместное распространение цифровых технологий все в большей мере определяет условия организации жизнедеятельности граждан Беларуси во всех сферах производства и досуга. Поэтому исследование основных причин и движущих сил расширенного внедрения этих технологий становится сегодня важной задачей социологической науки.

Цель работы – посредством социологического анализа выявить основные факторы распространения цифровых технологий в повседневных социально-экономических практиках населения Республики Беларусь. Факторы, способствующие этому процессу, мы выявляем и интерпретируем на основе оценок преимуществ и предпочитаемых направлений использования цифровых технологий, которые доминируют в общественном сознании населения республики.

Материалы и методы исследования. Эмпирической базой проводимого нами анализа выступают данные, полученные в ходе планового исследования отдела экономической социологии на тему «Факторы, специфика и социальные последствия процессов цифровизации в Республике Беларусь», проведенного Институтом социологии НАН Беларуси с участием автора в мае–июне 2024 г., в рамках выполнения Государственной программы научных исследований «Общество и гуманитарная безопасность белорусского государства», 2021–2025 годы; Подпрограмма 5 «Социология». В ходе исследования был использован метод поквартирного анкетного опроса во всех регионах республики (объем выборочной совокупности – 1850 респондентов, доверительный интервал – $\pm 2,28\%$, данные репрезентативны для населения Республики Беларусь).

Результаты и их обсуждение. Первичную социологическую процедуру выявления факторов распространения цифровых технологий как компонентов общественного сознания, обуславливающих новое содержание повседневных социально-экономических практик населения, произведем на основе распределения ответов респондентов на вопрос с возможностью множественного выбора вариантов: «Что из перечисленного Вы можете отнести к преимуществам использования цифровых технологий (гаджеты, сервисы, приложения и т. п.) в различных сферах?». Проведенная нами при помощи программного пакета SPSS процедура факторного анализа позволила выявить несколько вариантов группировок переменных. На наш взгляд, наиболее интерпретируемый вариант включает 5 факторов, которые в своей совокупности дают 73,17 % объясненной совокупной дисперсии. Представим эти факторы с переменными, входящими в их состав (в скобках указаны факторные нагрузки переменных).

Фактор 1 – «Интересные возможности»:

изменение способов организации повседневной жизни, упрощение выполнения повседневных задач (онлайн заказ еды, билетов; виртуальное посещение музеев, система «умный дом» и т. д.) (0,693);

появление новых форм платежных систем и возможностей осуществления финансовых операций (интернет-банкинг, мобильный банк, получение кредита онлайн, электронные кошельки, ЕРИП и т. п.) (0,682);

появление новых форм организации образовательного процесса, новых технических средств и приложений (электронные дневники, Moodle, Telegram-боты, чаты, искусственный интеллект, интерактивные доски и т. п.) (0,677);

возможность получения знаний, образования дистанционно (в любом месте, в любое время) (0,640);

появление международных торговых площадок – маркетплейсов (Wildberries, Ozon и т. п.) (0,586).

Первый – самый сильный и масштабный фактор, который объединяет целый ряд переменных с существенной корреляцией. Уже он один, по сути, «крупными мазками пишет картину» основных перемен в повседневной жизни людей, которые произошли под влиянием цифровизации.

Фактор 2 – «Привлекательная работа»:

новое техническое оборудование, программное обеспечение для улучшения производственных процессов (0,784);

появление новых профессий и форм занятости, новых возможностей для заработка за счет применения навыков использования цифровых технологий (удаленная работа, фриланс и т. д.) (0,680).

Фактор 3 – «Мониторинг здоровья»:

новые возможности в диагностике, лечении заболеваний и отслеживании состояния здоровья (цифровые тонометры, цифровые глюкометры и т. п.) (0,809);

новые способы/формы доступа к медицинским услугам (онлайн-консультация врача, электронная запись к врачу, электронная очередь и т. д.) (0,733).

Фактор 4 – «Безграничное общение»:

расширение возможностей общения с людьми в любой точке мира (0,829);

появление банкоматов, инфокиосков, позволяющих совершать финансовые операции в любое время суток (0,580).

Фактор 5 – «Быстрые услуги»:

новые формы обслуживания клиентов (онлайн обращения в сфере гос. услуг и ЖКХ, появление касс самообслуживания в магазинах и т. д.) (0,768);

появление банкоматов, инфокиосков, позволяющих совершать финансовые операции в любое время суток (0,580).

Как видим, переменная «Появление банкоматов, инфокиосков...», работающих в режиме 24/7, с равной факторной нагрузкой распределилась на два фактора – четвертый и пятый. Это может быть связано с тем обстоятельством, что как услуги связи, так и другие актуальные для населения услуги, предполагают безусловную и одинаково важную для пользователей возможность их круглосуточной и удаленной оплаты.

Выявленные факторы позволяют в первом приближении сформировать наиболее общее представление об основных причинах распространения цифровых технологий в повседневных социально-экономических практиках. Дальнейшее погружение в суть изучаемых процессов связано с более детальным изучением мотивации пользователей. Логика нашего научного поиска состоит в том, чтобы «пройти» от уже сформированной мотивации по цепочке «стимулы–интересы–мотивы», только в обратную сторону, т. е. аналитически воссоздать стимулы, которые обусловили мотивацию, и тем самым выйти на реконструкцию факторов распространения цифровых технологий.

Для этого на первом этапе мы выделили три группы социальных субъектов, которые различаются по уровню их мотивации, под которой мы понимаем внутреннее, уже сложившееся побуждение к действиям по освоению цифровых технологий. При ответе на вопрос «Планируете ли Вы осваивать цифровое оборудование, программы, сервисы в ближайшие год/два для повседневной жизни?» 42,7 % ответивших выразили такую готовность, поэтому мы определили их в группу с наименованием «**Активные**»; 38,2 % отметили, что «пока не планируют, но будут действовать по ситуации», их мы выделили в группу с названием «**Адаптивные**»; и оставшиеся 19,1 %, в планы которых не входит освоение цифровых технологий при любой ситуации, составили группу, которую мы назвали «**Пассивные**».

По социально-демографическим характеристикам выделенные группы ожидаемым образом распределились в территориальной дихотомии «город–село» и не показали сколько-нибудь ярких отличий в гендерном плане (табл. 1). Среди «Активных», естественно, большей оказалась доля жителей городов, где сравнительно лучше развита цифровая инфраструктура. В этой группе также несколько большая доля мужчин по сравнению с их представительством в группах «Адаптивных» и «Пассивных», где по гендерному основанию различий вообще не выявлено.

Наиболее выраженные отличия выделенных групп связаны с возрастом их представителей. В группе «Активных» лица до 30 лет составляют 26,1 %, от 30 до 49 лет – 46,6 %, от 50 лет и старше – 27,3 %. В группе «Адаптивных» доля молодежи до 30 лет уже заметно ниже, а именно – 10,0 %, доля лиц среднего возраста (от 30 до 49 лет) несколько меньше, чем в первой группе, –

42,7 %, а доля лиц от 50 лет и старше в 1,7 раз больше и составляет 47,3 %. В группе «Пассивных» преобладание лиц старшего возраста выражено еще заметнее. Представители в этой группе в возрасте до 30 лет составили всего 2,8 %, от 30 до 49 лет – 14,0 %, а самая большая доля – 83,2 % – это лица от 50 лет и старше. Собственно говоря, ничего удивительного в этом распределении по возрасту нет. Оно лишь констатирует тот факт, что представители молодежи с большей вероятностью оказываются реализаторами активного поведения в области освоения цифровых технологий.

Т а б л и ц а 1. Территориальное и гендерное распределение представителей выделенных групп (% по группам)

Table 1. Territorial and gender distribution of representatives of the identified groups (% by group)

Группа Group	Территория Territory		Пол Gender	
	Город City	Село Village	Мужской Male	Женский Female
Активные	84,7	15,3	46,2	53,8
Адаптивные	77,2	22,8	41,8	58,2
Пассивные	69,2	30,8	41,6	58,4

На втором этапе мы озадачились вопросом, чем же еще существенно отличаются, помимо возрастных характеристик, представители выделенных групп в «цифровом мире»? Самыми очевидными, потенциально наблюдаемыми и, судя по высокой активности при ответах, хорошо рефлекслируемыми признаками, по которым можно сравнивать группы «Активных», «Адаптивных» и «Пассивных», являются умения, навыки и качества, проявляемые социальными субъектами, входящими в эти группы, в области освоения цифровых технологий в повседневных социально-экономических практиках.

В качестве эмпирической основы для анализа групповых отличий мы взяли распределение ответов представителей выделенных групп на вопрос «В какой мере Вам присущи следующие навыки и качества?» (далее по тексту – компетенции). В перечне 12 оцененных респондентами компетенций (на предмет степени обладания) мы выделили 5 и объединили их в «Компетентностный» фактор. Эти 5 переменных в составе фактора наилучшим образом характеризуют компетентностный профиль пользователей цифровых технологий, в большей или меньшей мере включенных в процесс их освоения и использования в повседневных практиках. Это: 1. Навык обучения и переобучения; 2. Умение быстро адаптироваться к новым условиям, стрессоустойчивость; 3. Умение доводить начатое дело до конца, настойчивость; 4. Умение оценивать риски; 5. Умение решать задачи без посторонней помощи, самостоятельность. В рамках настоящей работы мы сознательно ограничили круг компетенций только «надпрофессиональными» или «мягкими» компетенциями [1]. Понятно, что субъекты, которые уже обладают профессиональными цифровыми компетенциями или активно формируют их, будут заведомо более продвинутыми пользователями цифровых технологий также и в повседневных практиках по сравнению с субъектами, профессиональная деятельность которых не связана столь глубоко с «цифрой». Поэтому профессиональные компетенции в наш фактор не входят. С целью снижения размерности пространства признаков мы рассчитали для каждой группы значения показателя групповой выраженности указанных компетенций по 5-балльной шкале, где 1 – минимальное, а 5 – максимальное значение показателя (рис. 1).

Сравнительный анализ значений показателя выраженности компетенций по группам свидетельствует о том, что, во-первых, компетентностные профили обладают преобладающей структурной идентичностью – большинство «реперных точек» профилей не нарушают принцип «больше-меньше»; во-вторых, компетентностный профиль «Адаптивных» заметно «тяготее» к компетентностному профилю «Активных», явно воспроизводя его «архитектуру»; в-третьих, навык переобучения явно «провисает» в группе «Пассивных» и тем самым в целом препятствует поднятию их профиля до уровня, близкого к уровню профиля по меньшей мере «Адаптивных». В связи с этим мы можем предположить, что частичное перераспределение группового потенциала «Пассивных» с заметно доминирующего навыка «целестремленности и настойчивости» в пользу «навыка к переобучению» может способствовать поднятию на шкале всего

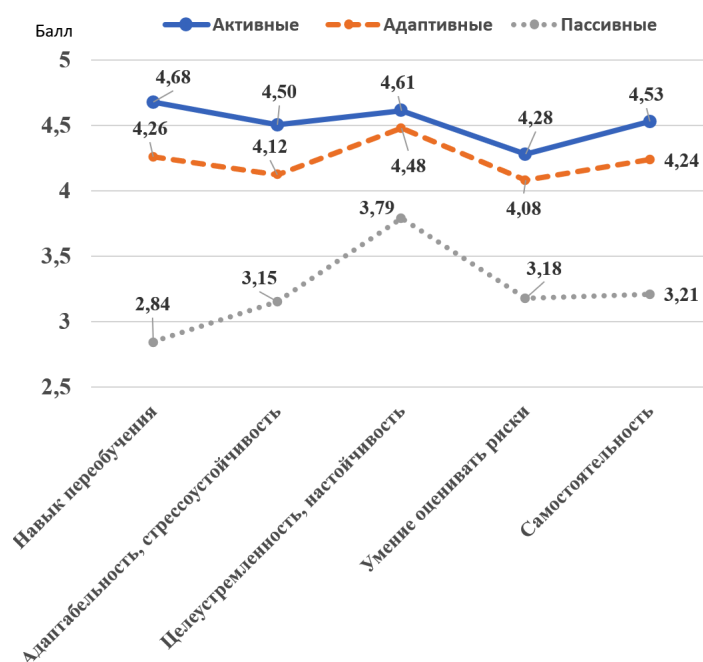


Рис. 1. Компетентностные профили «Активных», «Адаптивных» и «Пассивных»
(наименования компетенций сокращены)

Fig. 1. Competency profiles of “Active”, “Adaptive” and “Passive” (abbreviated names of competencies are given)

компетентностного профиля этой группы и его приближению к профилю «Адаптивных». В целом же компетентностные профили «Активных» и «Адаптивных» не столь уж отдалены друг от друга, что говорит о близких «стартовых условиях» на пути освоения цифровых технологий. И даже группа «Пассивных» в этом плане не выглядит такой уж безнадежной. Поэтому роль «Компетентностного» фактора освоения цифровых технологий, включающего в себя все 5 выделенных компетенций, мы характеризуем как в общем разрешающую, открывающую потенциальные возможности для успешного освоения этих технологий.

Что же тогда все-таки обуславливает «на выходе» существенно отличающуюся мотивацию субъектов, представляющих разные группы? В поисках ответа на этот вопрос на следующем этапе исследования обратимся к определяемому на основе самооценок показателю цифровой грамотности, значения которого мы рассчитываем, опираясь на распределение ответов респондентов на вопрос: «В какой мере Вам присуща цифровая грамотность?». В группе «Активных» 57,3 % уверены, что обладают ею в достаточной степени, 36,0 % отметили, что обладают, но в минимальной степени, 5,4 % полагают, что не обладают цифровой грамотностью (1,3 % – затруднились ответить). В группе «Адаптивных» 30,8 % указали на достаточную степень обладания, 44,1 % склонились к выбору минимальной степени, 23,5 % считают, что не обладают цифровой грамотностью (1,6 % – затруднились ответить). В группе «Пассивных» аналогичные доли составили: 7,7, 17,7 и 71,2 % (3,4 % – затруднились ответить). Как видим, фактор цифровой грамотности в самооценках респондентов, который мы для краткости будем далее условно называть «Грамотный» фактор в большей мере нежели «Компетентностный» дифференцирует группы. Это особенно хорошо заметно, если сравнить весомость этого фактора по группам в той же 5-балльной шкале, которую мы использовали ранее. В группе «Активных» мы получили значение 4,05 балла, в группе «Адаптивных» – 3,15 балла, а в группе «Пассивных» – 1,68 балла. Таким образом, роль «Грамотного» фактора состоит в расширении и конкретизации потенциально доступной меры освоения цифровых технологий на данный момент времени. Схожие результаты были получены в ходе оценки восприимчивости населения регионов России к внедрению цифровых технологий, где была «показана тесная положительная, однако не исчерпывающая взаимосвязь между цифровой грамотностью и уровнем цифровой восприимчивости населения. Чем

выше осведомленность жителей в отношении использования цифровых технологий, тем шире ими внедряются более сложные цифровые рутины (в первую очередь в сфере цифровой экономики и пространственной мобильности)» [2, с. 180].

Что влияет на весомость самого «Грамотного» фактора? Помимо оцениваемого респондентами уровня своих знаний о цифровых технологиях как на усиление, так и на ослабление этого фактора оказывают влияние социальные стереотипы как устойчивые программы мышления и поведения, причём, как правило, эмоционально окрашенные. Если в личностно значимом социальном окружении распространены представления о том, что «цифра – это круто!», то такой стереотип будет побуждать осваивать гаджеты. Если же, например, авторитетные для данного субъекта люди полагают, что «гаджеты отупляют!», то это будет порождать, как минимум, «прохладное» отношение к цифровым технологиям. Близкие по своей сути регуляторы, работающие на индивидуальном уровне, связаны с так называемой эмоциональной памятью [3, с. 21]. Если предыдущий опыт использования гаджетов связан у субъектов с положительными переживаниями, приятными эмоциями, то это будет на подсознательном уровне подталкивать их к дальнейшему обращению к цифровым устройствам, если же предыдущий опыт эмоционально негативный, то это будет, помимо воли, сдерживать освоение цифровых технологий в повседневных практиках. Российские коллеги, изучая распространение цифровых технологий в жизни россиян, также пришли к выводу, что «позитивное отношение к инновациям и информационно-коммуникационным технологиям определяется опытом применения современных технологий в образовательном процессе, возрастом и заинтересованностью (готовностью) респондентов к использованию инноваций и цифровых технологий в повседневной жизни. Отношение к инновациям определяется во многом психологическими характеристиками респондента, его готовностью воспринимать инновации. Несмотря на различные масштабы распространения таких инновационных практик, как использование планшета и дистанционные финансовые услуги, их распространённость определяется схожими факторами» [4, с. 45].

С учетом вышеизложенного, сильный, весомый «Грамотный» фактор существенным образом подталкивает субъекта к дальнейшему внедрению цифровых технологий в свои повседневные практики. В обратную сторону этот механизм тоже работает. Если субъект оценивает себя как недостаточно грамотного (или совсем не грамотного) в цифровом плане, то и «всматриваться» в стимуляционное поле цифровых технологий он не видит особого смысла.... Считает, что «может, для кого-то они и могут быть полезны, но лично я как обходился(-ась) без них, так и дальше проживу...». В этом случае оценка «цифрового» стимуляционного поля в кругу пассивных в цифровом плане субъектов может носить сугубо теоретический и эмоционально нейтральный, не побуждающий к действиям характер. Что мы и наблюдаем по результатам проведенного нами исследования.

При ответе на вопрос: «Что из перечисленного Вы можете отнести к преимуществам использования цифровых технологий (гаджеты, сервисы, приложения и т. п.) в различных сферах?» первую тройку самых распространенных во всех выделенных группах составили одни и те же ответы, только рейтинговые места «перемешаны» и доли выборов существенно отличаются. Вариант «появление новых форм платежных систем и возможностей осуществления финансовых операций (интернет-банкинг, мобильный банк, получение кредита онлайн, электронные кошельки, ЕРИП и т. п.)» выбрали 77,9 % «Активных» (I рейтинговое место в группе), 66,1 % «Адаптивных» (также I рейтинговое место) и 27,2 % «Пассивных» (III рейтинговое место); вариант «расширение возможностей общения с людьми в любой точке мира» отметили 70,0 % «Активных» (II место), 58,5 % «Адаптивных» (III место) и 30,9 % «Пассивных» (II место); вариант «появление банкоматов, инфокиосков, позволяющих совершать финансовые операции в любое время суток» указали 67,1 % «Активных» (III место), 60,5 % «Адаптивных» (II место) и 31,8 % «Пассивных» (I место в группе). Полученное распределение ответов позволяет нам сделать следующий вывод: представители выделенных групп «по контурам» видят в стимуляционном поле примерно одну и ту же структуру возможностей, но в видении «Пассивных» она «бледная» и «разреженная», а в видении «Активных» – «яркая» и «концентрированная». «Адаптивные» занимают промежуточное положение с тяготением к «Активным». Сформулированный вывод подтверждается тем,

что при ответе на указанный вопрос о преимуществах использования цифровых технологий 25,5 % «Пассивных» затруднились с ответом и 13,2 % представителей данной группы выбрали вариант «ничего из перечисленного». В группе «Адаптивных» аналогичные доли намного ниже: 8,6 и 2,4 %, а в группе «Активных» они составляют всего лишь 2,8 и 0,8 % соответственно.

В структуре стимуляционно-мотивационного механизма социального субъекта ключевую роль играет интерес, который обеспечивает оценку и избирательную активацию стимулов, присутствующих в поле возможностей, производя тем самым их трансформацию в мотивы действий субъекта [5, с. 47–49]. «Если физический мир подчинен закону движения, то мир духовный не менее подчинен закону интереса. На земле интерес есть всемогущий волшебник, изменяющий в глазах всех существ вид всякого предмета» [6, с. 186–187]. Даже если представить себе, что в определенной ситуации переменные в составе «Стимуляционного» фактора выражены заметно, т. е. имеется значительное количество потенциально привлекательных для субъекта возможностей в освоении цифровых технологий, но все они или большинство из них по тем или иным причинам субъекту не интересны, то он может все время так и остаться «прозябать на старте» и не включиться в реальный процесс освоения этих технологий. Оценить в социологическом измерении роль интереса как фактора распространения цифровых технологий позволяет распределение ответов респондентов на вопрос: «По каким направлениям Вы бы хотели повысить уровень своих знаний и навыков?». Исследование показало, что несмотря на сравнительно недавнюю всеохватывающую повседневные социально-экономические практики «цифровую экспансию», структура внутригрупповых интересов «Активных», «Адаптивных» и «Пассивных» к цифровым технологиям уже довольно сильно отличается (табл. 2). Это свидетельствует о том, что из всех рассматриваемых нами «субъектных» факторов («Компетентностный», «Грамотный», «Стимуляционный», «Интересный») именно «Интересный» фактор является самым сильным регулятором «цифрового» поведения социальных субъектов.

Т а б л и ц а 2. Распределение ответов на вопрос: «По каким направлениям Вы бы хотели повысить уровень своих знаний и навыков?», % (в скобках указаны рейтинговые места внутри группы)

Table 2. Distribution of answers to the question: “In what areas would you like to improve the level of your knowledge and skills?”, % (ranking places within the group are indicated in brackets)

Направление Direction	Группа Group		
	Активные Active	Адаптивные Adaptive	Пассивные Passive
Работа с искусственным интеллектом и изучение его возможностей	35,7 (1)	13,4 (5)	1,7 (10)
Правила безопасности в сети Интернет, защита личной информации	25,6 (2)	20,5 (1)	6,0 (4)
Недопущение вовлечения детей/подростков в незаконную/противоправную деятельность в интернете	21,0 (3)	14,1 (4)	3,1 (8)
Работа с различными программами и приложениями (как скачать, установить и пользоваться)	20,0 (4)	16,5 (3)	5,4 (5)
Правовые аспекты регулирования интернет-среды (защита интеллектуальной собственности, цензура и т. п.)	16,5 (5)	9,3 (9)	0,6 (12)
Подача онлайн документов, заявлений/заказ услуг в различных организациях (онлайн заполнение декларации, онлайн-запись к врачу, электронное обращение в ЖКХ и т. п.)	16,1 (6)	11,8 (7)	3,7 (6)
Работа с компьютером, смартфоном (базовые навыки)	15,1 (7)	19,1 (2)	15,4 (1)
Работа с информацией из источников в сети Интернет (как формулировать запрос, находить нужную информацию, проверить достоверность)	13,9 (8)	11,3 (8)	3,4 (7)
Ведение социальных сетей, каналов и т. д.	12,5 (9)	4,9 (11)	2,3 (9)
Оплата товаров и услуг с помощью онлайн-сервисов (интернет-банкинг, ЕРИП, мобильный банк и т. д.)	12,4 (10)	12,6 (6)	6,8 (2)
Использование онлайн-сервисов (Telegram, Zoom, Viber, Яндекс-такси и т. п.)	9,4 (11)	8,0 (10)	6,3 (3)
Кибербуллинг и как ему противостоять (травле и запугиванию в интернете)	9,2 (12)	4,9 (12)	0,9 (11)
Другое	0,6 (13)	0,3 (13)	0,3 (13)
Ничего из перечисленного	10,7	16,5	41,9
Затрудняюсь ответить	10,2	22,4	28,2
Нет ответа	0,9	0,6	0,3

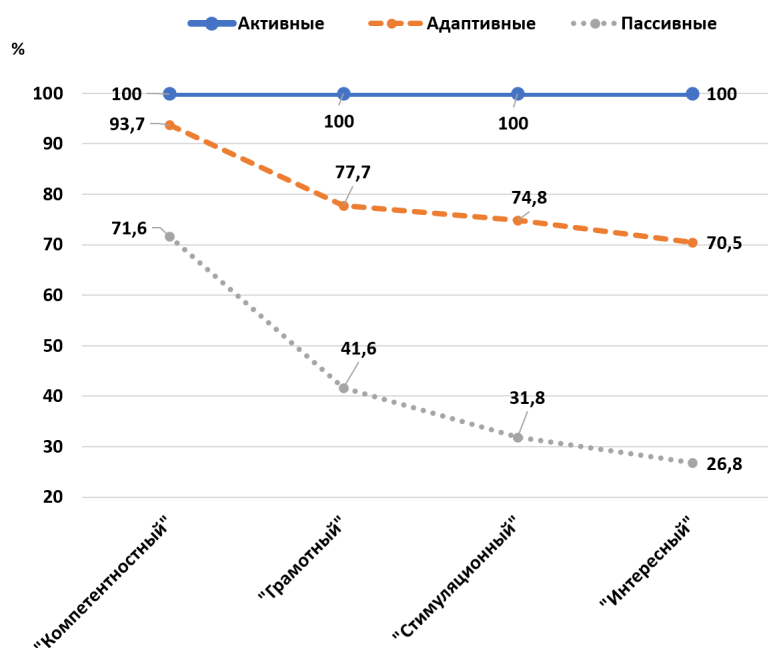


Рис. 2. Профили «субъектных» факторов распространения цифровых технологий в группах «Адаптивных» и «Пассивных» относительно профиля «Активных», принятого за эталон – 100 %

Fig. 2. Profiles of “subjective” factors of the spread of digital technologies in the “Adaptive” and “Passive” groups relative to the “Active” profile taken as the standard – 100 %

Сравнительный анализ данных по группам, представленных в табл. 2, позволяет сделать следующие основные выводы. Во-первых, проявленность общего интереса «Активных» к повышению своих знаний и навыков в области цифровых технологий, определяемая по частоте выбора всех ответов в данной группе, существенно выше, чем у «Адаптивных» и «Пассивных». Во-вторых, «Активные», образно говоря, готовы «рвануть» в освоении всех возможных преимуществ цифровых технологий «рука об руку» с искусственным интеллектом, хотя сами научиться это делать безопасно, и передать соответствующие навыки своим детям. В-третьих, «Адаптивные» пока даже в мыслях не могут себе позволить столь глубокое погружение в мир цифровых технологий, но уже довольно четко понимают, что погружению этому нужно учиться путем освоения безопасных навыков и технологий, и, в принципе, они к этому готовы. В-четвертых, «Пассивные» – это самая сложная группа, с одной стороны, в смысле отрицательной и отрицающей направленности их интереса к цифровым технологиям, а с другой – неожиданной, пусть и незначительной, включенности в их освоение. Вроде бы, в этом плане, им ничего не надо, но, вместе с тем, каждый шестой не против осваивать базовые навыки работы с компьютером или смартфоном.

Если степень выраженности группового интереса «активных» к освоению цифровых технологий, которую мы определяем по сумме всех ответов респондентов на вопрос «По каким направлениям Вы бы хотели повысить уровень своих знаний и навыков?», условно принять за 100 %, то в группе «Адаптивных» этот уровень составляет 70,5 %, а группа «Пассивных» демонстрирует лишь 26,8 % от степени выраженности интереса «Активных». По остальным «субъектным» факторам мы также рассчитали аналогичные значения, которые представлены на рис. 2.

Выявленные в ходе исследования профили «субъектных» факторов позволяют охарактеризовать роль «Компетентностного» фактора как «разрешающую», т. е. обеспечивающую на основе имеющихся навыков и качеств потенциальное вхождение социальных субъектов в мир цифровых технологий. Роль «Грамотного» фактора – «подготавливающая», формирующая теоретические основы и соответствующий положительный эмоциональный настрой на освоение цифровых технологий. Роль «Стимуляционного» фактора – «предстартовая», задающая спектр имеющихся возможностей в области цифровых программ, сервисов, приспособлений. Роль «Ин-

тересного» фактора – «включающая», т. е. запускающая в работу весь стимуляционно-мотивационный механизм активации поведения социальных субъектов в области освоения цифровых технологий в повседневных социально-экономических практиках.

Заключение. Факторы, определяющие распространение объекта исследования – цифровых технологий в повседневных социально-экономических практиках населения («объектные» факторы), – наиболее «фактурно» представлены «пятеркой» детерминант, включающей: 1) комплекс новых интересных возможностей, облегчающих и ускоряющих рутинные операции, а также – упрощающих включение человека в образовательные процессы; 2) высокотехнологичные и гибкие формы занятости, которые обеспечивают существенно более комфортные условия труда и дают работнику невиданные ранее степени свободы в плане места и времени включения в трудовые процессы; 3) эффективные технические средства и способы реализации самосохранительных моделей поведения; 4) разнообразные и доступные средства коммуникации вне границ и расстояний; 5) удобные и быстрые способы получения многочисленных, в том числе финансовых, услуг. Эти «объектные» факторы задают «общий тон» в распространении цифровых технологий в повседневной жизни.

Детализация «факторной палитры» предполагает выделение, наряду с «объектными» факторами, еще и группы «субъектных» факторов, непосредственно детерминирующих мотивацию социальных субъектов к освоению цифровых технологий. Среди «субъектных» факторов, как показало проведенное исследование, ключевую роль играет «Интересный» фактор. Мало знать или думать, что знаешь о цифровых технологиях. Пока не будет сформирован конкретный интерес, преобразующий потенциальные возможности стимуляционного поля в мотивы как внутренние побуждения к действиям, освоение цифровых технологий не произойдет. А формирование интереса (ненавязчивое и аккуратное в отношении «Адаптивных» и особенно – «Пассивных») возможно через обучение, дополнительное образование, доступные мастер-классы по освоению новых социальных практик, чтобы постепенно «разогревался интерес», который потом «увидит» в стимуляционном поле привлекательные для человека возможности. Так, во-первых, сформируется внутреннее побуждение к действию и, во-вторых, одновременно поднимется самооценка цифровой грамотности. Стратегически важно в организации переобучения «Адаптивных» и, по возможности, «Пассивных» учитывать степень и направленность (по конкретным задачам и сферам приложения) проявленных ими интересов в освоении цифровых технологий.

Список использованных источников

1. Айбазова, М. Ю. Формирование надпрофессиональных компетенций студентов в цифровой образовательной среде / М. Ю. Айбазова, А. К. Айбазова, А. А. Карасова // Вестник Омского государственного педагогического университета. Гуманитарные исследования. – 2021. – № 2 (31). – С. 143–147. <https://doi.org/10.36809/2309-9380-2021-31-143-147>
2. Михайлова, А. А. Оценка восприимчивости населения регионов России к внедрению цифровых технологий / А. А. Михайлова // Балтийский регион. – 2021. – Т. 13, № 3. С. 168–184. <https://doi.org/10.5922/2079-8555-2021-3-9>
3. Дейнека, О. С. Экономическая психология / О. С. Дейнека. – СПб., 2000. – 160 с.
4. Кучмаева, О. В. Цифровые технологии в повседневной жизни россиян / О. В. Кучмаева, М. Ю. Архипова // Вопросы статистики. – 2021. – № 28 (3). – С. 45–55. <https://doi.org/10.34023/2313-6383-2021-28-3-45-55>
5. Кобяк, О. В. Экономическое поведение: принципы и методы социологического моделирования / О. В. Кобяк. – Минск, 2015. – 240 с.
6. Гельвеций, К. А. Сочинения: в 2 т. / К. А. Гельвеций. – М., 1973. – Т. 1. – 647 с.

References

1. Aybazova M. Yu., Aybazova A. K., Karasova A. A. Formation of supra-professional competences of students in the digital educational environment. *Vestnik Omskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta. Gumanitarnye issledovaniya* = *Review of Omsk State Pedagogical University. Humanitarian Research*, 2021, no. 2 (31), pp. 143–147 (in Russian). <https://doi.org/10.36809/2309-9380-2021-31-143-147>
2. Mikhaylova A. A. Valuating the appropriation of digital technologies across Russian regions. *Baltic Region*, 2021, vol. 13, no. 3, pp. 168–184 (in Russian). <https://doi.org/10.5922/2079-8555-2021-3-9>
3. Deineka O. S. *Economic Psychology*. St.-Petersburg, 2000. 160 p. (in Russian).

4. Kuchmaeva O. V., Arkhipova M. Yu. Digital technologies in everyday life of the Russians. *Voprosy statistiki = Statistics questions*, 2021, no. 28 (3), pp. 45–55 (in Russian). <https://doi.org/10.34023/2313-6383-2021-28-3-45-55>
5. Kabiak A. V. *Economic behavior: principles and methods of sociological modeling*. Minsk, 2015. 240 p. (in Russian).
6. Helvetius K. A. *Collected Works in 2 vol.* Moscow, 1973, vol. 1. 647 p. (in Russian).

Информация об авторе

Кобяк Олег Витальевич – д-р социол. наук, профессор, заведующий отделом. Институт социологии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 1/2, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: aleh.kabiak@mail.ru. ORCID: 0000-0001-9520-576X.

Information about the author

Kabiak Aleh V. – D. Sc. (Sociology), Professor, Head of the Department. Institute of Sociology of the National Academy of Sciences of Belarus (1/2, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: aleh.kabiak@mail.ru. ORCID: 0000-0001-9520-576X.

АГРАРНЫЕ НАУКИ

AGRARIAN SCIENCES

УДК 632.15:579.64

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2025-69-3-258-264>

Поступило в редакцию 10.01.2025

Received 10.01.2025

Академик В. В. Лапа, Н. А. Михайловская, Т. В. Погирницкая

*Институт почвоведения и агрохимии Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь***СПОСОБНОСТЬ КАЛИЙМОБИЛИЗУЮЩИХ БАКТЕРИЙ *BACILLUS*
МЕТАБОЛИЗИРОВАТЬ ГЕРБИЦИД ГЛИФОСАТ
С ОБРАЗОВАНИЕМ МЕТИЛГЛИЦИНА**

Аннотация. Установлена перспективность ризосферных калиймобилизующих бактерий *Bacillus* (исследовательская коллекция Института почвоведения и агрохимии) в качестве инокулянтов в условиях интенсивного применения гербицида глифосат. Показано, что штаммы *Bacillus* K-32, K-54, K-62, K-65, K-81 и Kт способны разлагать глифосат с образованием саркозина (метилглицина) и неорганического фосфата, обеспечивая безопасную детоксикацию гербицида. Определена деструктивная активность калиймобилизующих ризобактерий *in vitro*. При концентрации глифосата 300 мг/л деструктивная активность штаммов *Bacillus* K-32, K-54, K-62, K-65, K-81 и Kт составляет 50,6, 43,9, 48,4, 46,3, 65,4 и 64,4 %; при концентрации глифосата 500 мг/л деструктивная активность штаммов – 40,6, 38,6, 40,1, 42,2, 58,4 и 48,1 % соответственно. Применение глифосат-утилизирующих ризобактерий *Bacillus* оказывает полифункциональное воздействие на растения в широком диапазоне содержания глифосата в почве (0–50 л/га), что проявляется в стимуляции роста и развития корневой системы, улучшении калийного питания инокулированных растений за счет мобилизации калия из калийсодержащих почвенных минералов.

Ключевые слова: *Bacillus*, глифосат, катаболизм, детоксикация, биологическая мобилизация калия

Для цитирования. Лапа, В. В. Способность калиймобилизующих бактерий *Bacillus* метаболизировать гербицид глифосат с образованием метилглицина / В. В. Лапа, Н. А. Михайловская, Т. В. Погирницкая // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2025. – Т. 69, № 3. – С. 258–264. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2025-69-3-258-264>

Academician Vitaly V. Lapa, Natallia A. Mikhailovskaya, Tatsiana V. Pahirnitskaya

*Institute for Soil Science and Agrochemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus***RHIZOSPHERE K-MOBILIZING BACTERIA *BACILLUS* CAPABILITY OF GLYPHOSATE
METABOLIZATION WITH METHYLGLYCYN FORMATION**

Abstract. Rhizosphere bacteria *Bacillus*, preserved in the of the Institute for Soil Science and Agrochemistry, were characterized as promising plant inoculants under intensive application of herbicide glyphosate. Bacteria strains *Bacillus* K-32, K-54, K-62, K-65, K-81, and Kт were found to metabolize glyphosate without the formation of aminomethylphosphonic acid. Bacteria strains *Bacillus* K-32, K-54, K-62, K-65, K-81 and Kт are capable of glyphosate decomposition with the formation of safe chemical products. These chemical products include sarcosine (methylglycine) and inorganic phosphate (Pi). The destruction activities of *Bacillus* strains were calculated on the basis of the accumulation of inorganic phosphate in culture liquids. Under glyphosate concentration of 300 mg/l, the destruction activities of *Bacillus* K-32, K-54, K-62, K-65, K-81, and Kт strains were equal to: 50.6, 43.9, 48.4, 46.3, 65.4 and 64.4 %, respectively. Under glyphosate content 500 mg/l, the destruction activities were equal to: 40.6, 38.6, 40.1, 42.2, 58.4 and 48.1 % respectively. The application of potassium-mobilizing rhizobacteria *Bacillus* as inoculants resulted in a significant stimulation effect on plants at high diapason of glyphosate content in the soil (0–50 l/ha). This stimulation effect is manifested in plant growth (stems and roots) and the improvement of plant potassium nutrition.

Keywords: *Bacillus*, glyphosate, catabolism, detoxification, potassium mobilization

For citation. Lapa V. V., Mikhailovskaya N. A., Pahirnitskaya T. V. Rhizosphere K-mobilizing bacteria *Bacillus* capability of glyphosate metabolization with methylglycyn formation. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2025, vol. 69, no. 3, pp. 258–264 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2025-69-3-258-264>

Введение. Глифосат (ГФ) занимает лидирующее место в мире по производству и является самым интенсивно используемым гербицидом в истории химизации сельского хозяйства [1–4]. Глифосат ($C_3H_8NO_5P$) представляет собой производное фосфоновой кислоты [5]. Впервые глифосат (N-фосфометилглицин) был синтезирован в Швейцарии в 1950 г. и использовался как хелатирующий агент для связывания и удаления металлов из растворов. Гербицидные свойства глифосата были обнаружены в 1970 г., а его промышленное производство под коммерческим названием Раундап началось в США в 1974 г.

Интенсивное применение глифосата, связанное с его эффективностью, невысокой стоимостью и созданием устойчивых к гербициду сортов сельскохозяйственных культур, привело к практически повсеместному обнаружению остаточных количеств ГФ и его основного метаболита, аминометилфосфоновой кислоты (АМФК), в окружающей среде и продукции растениеводства [1–3].

Установлен широкий спектр негативных воздействий глифосата и АМФК на живые организмы. Глифосат и его метаболит АМФК оказывают цитотоксическое действие на клетки человека, вызывая их апоптоз [3]. Известно негативное действие на репродуктивное здоровье человека, глифосат приводит к гибели эмбриональных и плацентарных клеток [3; 4]. Действие глифосата вызывает эндокринные нарушения у человека [3], отмечается негативное действие на эритроциты крови [4]. В тканях человека и животных обнаруживаются остатки глифосата [4]. Это вызывает необходимость детоксикации ГФ и АМФК в окружающей среде [1; 3; 6].

Для снижения негативных последствий многократного применения глифосата необходима периодическая ремедиация. По современным представлениям микробные методы разложения ГФ и АМФК считаются самыми эффективными, так как могут обеспечить разложение глифосата и АМФК до экологически безопасных соединений [1; 4–6]. Активными деструкторами гербицида являются бактерии. Применение бактерий-деструкторов, способных разлагать глифосат до безопасных химических продуктов, обосновано с экологических и экономических позиций.

Безопасная детоксикация глифосата предполагает применение бактериальных деструкторов, использующих глифосат как источник фосфора, при этом фосфоновая С–Р связь в молекуле гербицида разрушается с образованием неорганического фосфата. Такие бактериальные деструкторы имеют активные С–Р лиазные ферментные системы [1; 5; 6]. В пределах одного рода бактерий только отдельные штаммы имеют активные С–Р лиазы и способны обеспечивать детоксикацию ГФ.

Наиболее перспективен поиск деструкторов глифосата среди ризосферных бактерий, предназначенных для применения в качестве инокулянтов. В Институте почвоведения и агрохимии имеется коллекция слизиобразующих *Bacillus*, которые широко распространены в зоне умеренного климата и представляют большой интерес как инокулянты. В состав микробных слизей входят полисахариды и уроновые кислоты, содержащие карбоксильные и фенольные группы, способные образовывать комплексные связи с химическими элементами в составе минералов. Действие микробных слизей приводит к их постепенному высвобождению из кристаллической решетки и переходу в растворимое состояние [7; 8]. Образование слизи является также важным защитным фактором, обеспечивающим выживание бактерий при неблагоприятных экологических условиях.

Наши многолетние исследования с коллекционными штаммами *Bacillus* показали, что их применение в качестве инокулянтов индуцирует существенный гормональный эффект и улучшает калийное питание в ризосфере за счет мобилизации калия из почвенных минералов, слюд и гидрослюд [7; 8], повышает доступность трехзамещенных фосфатов [9] и обеспечивает биологический контроль корневых фитопатогенов [10]. Совокупное действие указанных факторов способствует повышению урожайности и качества растениеводческой продукции [7; 8; 11].

В результате скрининга коллекционного фонда *Bacillus* установлено, что ряд штаммов калиймобилизующих ризобактерий проявляют значимую активность в отношении деструкции глифосата [12]. Это подтверждает полифункциональность *Bacillus* и расширяет область их практического применения.

Цель исследований – изучение способности слизиобразующих бацилл *Bacillus* исследовательской коллекции метаболизировать гербицид глифосат с образованием метилглицина (саркозина).

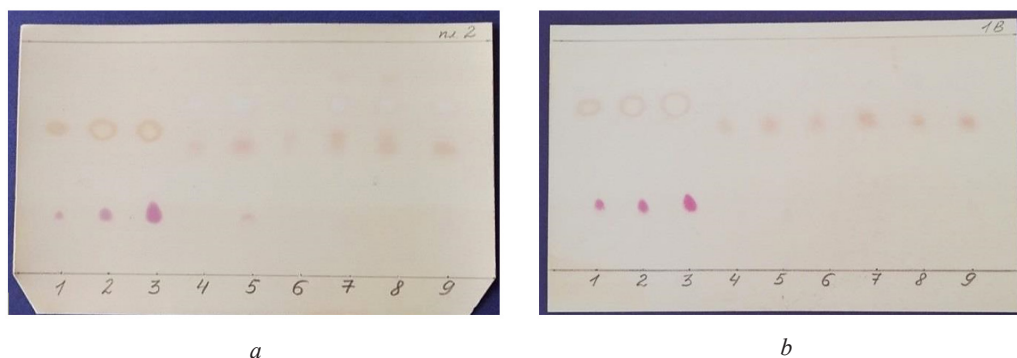
Материалы и методы исследований. Для изучения продуктов катаболизма глифосата проведены модельные эксперименты по культивированию ризобактерий *Bacillus* с глифосатом как единственным источником фосфора. В колбы Эрленмейера (объем 250 мл) со 100 мл жидкой минеральной среды Дворкина–Фостера [12] вносили 600 (C₁) или 1000 (C₂) мкл гербицида Торнадо и по 2 мл инокулянта. Инкубация проводилась в термостате 7 суток при 28 °С при постоянном перемешивании (шейкер орбитальный KS-501 digital IKA WERKE, 80 об/мин). Инкубационную смесь центрифугировали (10 мин, 5000 об/мин), затем фильтровали через мембранный фильтр (0,2 мкм) для получения бесклеточной культуральной жидкости (КЖ).

Анализ и идентификацию продуктов катаболизма глифосата в бесклеточной культуральной жидкости *Bacillus* проводили методом тонкослойной хроматографии (ТСХ) [13; 14]. Использовали хроматографические пластины Сорбфил ПТСХ-АФ-Ф-УФ (Россия). Система растворителей: изопропанол : 5 %-ный водный NH₄OH в соотношении 1 : 1 (V / V). Хроматография восходящим способом. После разделения КЖ на индивидуальные компоненты, пластины высушивали. Для обнаружения аминов (глифосат и глицин) полученные хроматограммы обрабатывали раствором нингидрина в ацетоне (0,25 %) и нагревали в течение 1–2 мин при 80 °С. В присутствии аминов на пластине проявляются окрашенные пятна, соответствующие индивидуальным веществам: розово-фиолетовые пятна глифосата и оранжево-бурые пятна глицина [13; 14]. Сначала на хроматограмме проявляются первичные амины, глицин и аминотетрафосфоновая кислота, позднее по времени проявляются вторичные амины, глифосат и саркозин.

Деструктивную активность *Bacillus* оценивали по накоплению неорганического фосфата (Pi) в бесклеточной КЖ. Концентрацию Pi определяли колориметрическим методом по J. P. Murphy, J. P. Riley [15]. В мерные колбы (объем 50 мл) отбирали по 2 мл КЖ, доводили до метки дистиллированной водой. В пробирки отбирали по 5 мл разбавленной КЖ, приливали 1 мл окрашивающего раствора и выдерживали 10 мин при комнатной температуре для развития окраски. Оптическую плотность (OD₇₁₀) измеряли на спектрофотометре Metertech UV-VISSP 8001. В присутствии неорганического фосфата раствор окрашивается в голубой цвет с фиолетовым оттенком. По количеству накопившегося за время инкубации Pi в культуральной жидкости рассчитывали деструктивную активность ризобактерий.

Результаты и их обсуждение. Необходимо отметить сложность проблемы идентификации глифосата в смесях, которая обусловлена его химическими свойствами. Молекула глифосата содержит фрагмент фосфоновой кислоты, фрагмент карбоновой кислоты и аминокгруппу. Глифосат проявляет свойства трех классов химических соединений, что усложняет его идентификацию. В молекулах глифосата и АМФК отсутствуют хромофоры, поэтому невозможно использование спектральных методов для определения этих веществ в видимой части спектра. В настоящее время основными методами идентификации глифосата являются хроматография (жидкостная, газовая, ионная), сочетание хроматографии с масс-спектрометрией и тонкослойная хроматография. В наших исследованиях использован метод ТСХ.

Хроматография в тонком слое сорбента является доказательным экспресс-методом разделения и идентификации малых количеств органических соединений и широко используется, в том числе для идентификации продуктов катаболизма глифосата в культуральной жидкости ГФ-утилизирующих ризобактерий [13; 14]. Основным критерием в методе ТСХ является коэффициент хроматографической подвижности *R_f*. Для идентификации индивидуальных веществ используют стандарты, коэффициент хроматографической подвижности которых известен.



ТСХ-хроматограммы бесклеточной КЖ штаммов *Bacillus* после 4 недель инкубации в жидкой среде с ГФ (источник фосфора): а) 1–3: глицин + глифосат; 4 и 5 – *Bacillus* К-32; 6 и 7 – *Bacillus* К-54; 8 и 9 – *Bacillus* К-62; б) 1–3: глицин + глифосат; 4 и 5 – *Bacillus* К-65; 6 и 7 – *Bacillus* К-81; 8 и 9 – *Bacillus* Кт

TLC-chromatograms of cell-free culture liquids of *Bacillus* after incubation in liquid medium with glyphosate (phosphorus source) during 4 weeks: а) 1–3: glycine + glyphosate; 4 and 5 – *Bacillus* К-32; 6 and 7 – *Bacillus* К-54; 8 and 9 – *Bacillus* К-62; б) 1–3: glycine + glyphosate; 4 and 5 – *Bacillus* К-65; 6 and 7 – *Bacillus* К-81; 8 and 9 – *Bacillus* Кт

Т а б л и ц а 1. Хроматографическая подвижность (R_f) продуктов катаболизма глифосата (изопропанол : 5 %-ный водный NH_4OH (1 : 1, V / V))

Table 1. Chromatographic motility (R_f) of glyphosate catabolism products (isopropanol : 5 % water NH_4OH (1 : 1, V / V))

Продукт катаболизма Product of catabolism	R_f
Глицин	$0,64 \pm 0,025$
Саркозин	$0,54 \pm 0,022$
Глифосат	$0,33 \pm 0,010$
АМФК	$0,25 \pm 0,010$

Получены хроматограммы бесклеточной культуральной жидкости калиймобилизующих ризобактерий *Bacillus* К-32, К-54 и К-62 после трех недель инкубации при содержании ГФ в среде 1,0 и 2,0 мг ГФ/мл. Анализ ТСХ-хроматограмм свидетельствует, что протестированные штаммы нашей коллекции разлагают глифосат, в культуральной жидкости он практически отсутствует. На ТСХ-хроматограмме регистрируется новое вещество с более высокой хроматографической подвижностью, R_f которого соответствует саркозину (метилглицину) (рисунок, а; табл. 1).

Анализ хроматограмм бесклеточных КЖ штаммов *Bacillus* К-65, К-81 и Кт показал, что их культивирование в жидкой среде с глифосатом (1,0 и 2,0 мг ГФ/мл) как источником фосфора приводит к разложению гербицида. При этом продуктом катаболизма глифосата является безопасный саркозин (метилглицин) ($R_f = 0,54 \pm 0,022$). Аминотетрафосфоновая кислота ($R_f = 0,25 \pm 0,01$) среди продуктов катаболизма не обнаружена (рисунок, б; табл. 1).

Это означает, что отобранные в результате скрининга шесть штаммов *Bacillus* разлагают глифосат по безопасному пути, без образования аминотетрафосфоновой кислоты. Полученные данные указывают на разрыв фосфоновой связи в молекуле глифосата под действием калиймобилизующих бацилл и предполагают наличие С–Р лиазной активности у коллекционных штаммов *Bacillus* К-32, К-54, К-62, К-65, К-81 и Кт.

В настоящее время обсуждаются два основных пути микробной деградации глифосата в почве. При разрыве фосфоновой С–Р связи в молекуле глифосата продуктами его разложения являются саркозин (метилглицин) и неорганический фосфат [1; 4–6]. По второму пути при разрыве связи С–N продуктами разложения являются аминотетрафосфоновая кислота (в которой сохраняется фосфоновая связь) и глиоксилат [1; 4; 6].

При деструкции глифосата по фосфоновой С–Р связи в культуральной жидкости бактерий регистрируется неорганический фосфор (Pi), по накоплению которого можно количественно оценить деструктивную активность штаммов *Bacillus* [5; 6]. Для определения деструктивной активности ризобактерий по накоплению неорганического фосфата (Pi) проведены *in vitro* эксперименты с культивированием калиймобилизующих бактерий в жидкой среде Дворкина–Фостера [12] с разным содержанием глифосата в качестве источника фосфора: C_1 – 300 мг ГФ/л и C_2 – 500 мг ГФ/л. По истечении 7 суток в бесклеточной КЖ определяли содержание неорганического фосфата колориметрическим методом J. P. Murphy, J. P. Riley [15]. На основании количественных данных по содержанию неорганического фосфата (Pi) в бесклеточной КЖ *Bacillus* с учетом химического состава глифосата (изопропиламинная соль $C_3H_8NO_5P$) рассчитаны показатели деструктивной активности штаммов слизеобразующих бацилл.

При концентрации глифосата 300 мг/л наиболее высокая деструктивная активность отмечена у штаммов *Bacillus* К-81 и Кт – в пределах 64,4–65,4 %. Деструктивная активность штаммов *Bacillus* К-32, К-54, К-62 и К-65 составила 43,9–50,6 % соответственно (табл. 2).

Т а б л и ц а 2. Деструктивная активность ГФ-утилизующих ризобактерий *Bacillus* при исходной концентрации глифосата 300 мг/л

Table 2. Destructive activity of glyphosate-utilizing bacteria *Bacillus* under initial glyphosate concentration 300 mg/l

Показатель Index	<i>Bacillus</i> К-32	<i>Bacillus</i> К-54	<i>Bacillus</i> К-62	<i>Bacillus</i> К-65	<i>Bacillus</i> К-81	<i>Bacillus</i> Кт
Накопление (Pi) за 7 дней инкубации, мг/л (PO_4^{-3})	21,2	18,4	20,3	19,4	27,4	27,0
Разложилось глифосата, мг/л	151,7	131,7	145,3	138,8	196,1	193,2
Деструктивная активность, %	50,6	43,9	48,4	46,3	65,4	64,4

При концентрации глифосата 500 мг/л деструктивная активность *Bacillus* К-81 и Кт – в пределах 48,1–58,4 %. Деструктивная активность штаммов *Bacillus* К-32, К-54, К-62 и К-65 составила 38,6–42,2 % соответственно (табл. 3).

Т а б л и ц а 3. Деструктивная активность ГФ-утилизующих ризобактерий *Bacillus* при исходной концентрации глифосата 500 мг/л

Table 3. Destructive activity of glyphosate-utilizing bacteria *Bacillus* under initial glyphosate concentration 500 mg/l

Показатель Index	<i>Bacillus</i> К-32	<i>Bacillus</i> К-54	<i>Bacillus</i> К-62	<i>Bacillus</i> К-65	<i>Bacillus</i> К-81	<i>Bacillus</i> Кт
Накопление Pi за 7 дней инкубации, мг/л (PO_4^{-3})	28,4	27,0	28,0	29,5	40,8	33,6
Разложилось глифосата, мг/л	203,2	193,2	200,4	211,1	292,0	240,5
Деструктивная активность, %	40,6	38,6	40,1	42,2	58,4	48,1

Закключение. Установлена способность ризосферных слизеобразующих бактерий *Bacillus* исследовательской коллекции Института почвоведения и агрохимии метаболизировать гербицид глифосат без образования аминотетрафосфоновой кислоты, что свидетельствует об их перспективности в качестве инокулянтов, в особенности в условиях интенсивного применения гербицида глифосат. В модельных *in vitro* экспериментах по культивированию ризобактерий *Bacillus* с глифосатом (источник фосфора) идентифицированы продукты катаболизма гербицида. Методом тонкослойной хроматографии установлено, что исследованные штаммы разлагают глифосат по безопасному пути с образованием метилглицина (саркозина) и неорганического фосфата. Деструктивная активность слизеобразующих бацилл рассчитана по накоплению неорганического фосфата (Pi) в культуральной жидкости. При концентрации глифосата 300 мг/л деструктивная активность шести штаммов *Bacillus* К-32, К-54, К-62, К-65, К-81 и Кт составила: 50,6; 43,9; 48,4; 46,3; 65,4 и 64,4 %; при концентрации глифосата 500 мг/л деструктивная активность составила: 40,6; 38,6; 40,1; 42,2; 58,4 и 48,1 % соответственно.

Список использованных источников

1. Recent advances in glyphosate biodegradation / H. Zhan, Y. Feng, X. Fan, S. Chen // *Applied Microbiology and Biotechnology*. – 2018. – Vol. 102. – P. 5033–5043. <https://doi.org/10.1007/s00253-018-9035-0>
2. Carlisle, S. M. Glyphosate in the environment / S. M. Carlisle, J. T. Trevors // *Water, Air and Soil Pollution*. – 1988. – Vol. 39. – P. 409–420. <https://doi.org/10.1007/bf00279485>
3. Chaufan, G. Glyphosate commercial formulation causes cytotoxicity, oxidative effects, and apoptosis on human cells: Differences with its active ingredient / G. Chaufan, I. Coalova, M. Molina // *International Journal of Toxicology*. – 2014. – Vol. 33, N 1. – P. 29–38. <https://doi.org/10.1177/1091581813517906>
4. Михайловская, Н. А. Глифосат и аминометилфосфоновая кислота в природных средах и их микробная трансформация / Н. А. Михайловская // *Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук*. – 2024. – Т. 62, № 2. – С. 114–125. <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2024-62-2-114-125>
5. Kamat, S. S. The enzymatic conversion of phosphonates to phosphate by bacteria / S. S. Kamat, F. M. Raushel // *Current Opinion in Chemical Biology*. – 2013. – Vol. 17, N 4. – P. 589–596. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2013.06.006>
6. Биодegradация фосфорорганических загрязнителей почвенными бактериями: биохимические аспекты и нерешенные проблемы / А. В. Свиридов, Т. В. Шушкова, Д. О. Эпиктетов [и др.] // *Биотехнология*. – 2020. – Т. 36, № 4. – С. 126–135. <https://doi.org/10.21519/0234-2758-2020-36-4-126-135>
7. Михайловская, Н. А. Количественная оценка активности калиймобилизирующих бактерий и их эффективность на посевах озимой ржи // *Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук*. – 2006. – № 3. – С. 41–46.
8. Лапа, В. В. Эффективность бактериального удобрения калиплант на дерново-подзолистой супесчаной почве с разной обеспеченностью калием / В. В. Лапа, Н. А. Михайловская, Т. Б. Барашенко // *Агрохимия*. – 2016. – № 6. – С. 29–38.
9. Активность фосфатмобилизации у ризобактерий / Н. А. Михайловская, О. Миканова, Т. Б. Барашенко, Т. В. Барашенко // *Почвоведение и агрохимия*. – 2007. – № 1 (38). – С. 225–231.
10. Михайловская, Н. А. Антагонистическая активность ризобактерий *A. brasilense* и *B. circulans* по отношению к фитопатогенным микромицетам рр. *Fusarium* и *Alternaria* / Н. А. Михайловская, Т. Б. Барашенко // *Почвоведение и агрохимия*. – 2019. – № 1 (62). – С. 234–244.
11. Mikhailouskaya, N. K-mobilizing bacteria and their effect on wheat yield / N. Mikhailouskaya, A. Tchernysh // *Agronomijas vestis (Latvian Journal of Agronomy)*. – 2005. – Vol. 8. – P. 147–150.
12. Скрининг способности калиймобилизирующих ризобактерий метаболизировать гербицид глифосат / Н. А. Михайловская, Т. Б. Барашенко, Т. В. Погирицкая, С. В. Дюсова // *Почвоведение и агрохимия*. – 2022. – № 1 (68). – С. 200–212. [https://doi.org/10.47612/0130-8475-2022-1\(68\)-200-212](https://doi.org/10.47612/0130-8475-2022-1(68)-200-212)
13. Зеленкова, Н. Ф. Определение глифосата и продуктов его биодegradации хроматографическими методами / Н. Ф. Зеленкова, Н. Г. Винокурова // *Журнал аналитической химии*. – 2008. – Т. 63, № 9. – С. 958–961.
14. Ragab, M. T. H. Thin-layer chromatographic detection of glyphosate herbicide (N-phosphonomethyl glycine) and its aminomethyl phosphonic acid metabolite / M. T. H. Ragab // *Chemosphere*. – 1978. – Vol. 7, N 2. – P. 143–153. [https://doi.org/10.1016/0045-6535\(78\)90041-3](https://doi.org/10.1016/0045-6535(78)90041-3)
15. Murphy, J. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters / J. Murphy, J. P. Riley // *Analytica Chimica Acta*. – 1962. – Vol. 27. – P. 31–36. [https://doi.org/10.1016/s0003-2670\(00\)88444-5](https://doi.org/10.1016/s0003-2670(00)88444-5)

References

1. Zhan H., Feng Y., Fan X., Chen S. Recent advances in glyphosate biodegradation. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2018, vol. 102, pp. 5033–5043. <https://doi.org/10.1007/s00253-018-9035-0>
2. Carlisle S. M., Trevors J. T. Glyphosate in the environment. *Water, Air and Soil Pollution*, 1988, vol. 39, pp. 409–420. <https://doi.org/10.1007/bf00279485>
3. Chaufan G., Coalova I., Molina M. Glyphosate commercial formulation causes cytotoxicity, oxidative effects, and apoptosis on human cells: Differences with its active ingredient. *International Journal of Toxicology*, 2014, vol. 33, no. 1, pp. 29–38. <https://doi.org/10.1177/1091581813517906>
4. Mikhailouskaya N. A. Glyphosate and aminomethylphosphonic acid in the environment and their microbial transformation. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2024, vol. 62, no. 2, pp. 114–125 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2024-62-2-114-125>
5. Kamat S. S., Raushel F. M. The enzymatic conversion of phosphonates to phosphate by bacteria. *Current Opinion in Chemical Biology*, 2013, vol. 17, no. 4, pp. 589–596. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2013.06.006>
6. Sviridov A. V., Shushkova T. V., Epiktetov D. O., Tarlachkov S. V., Ermakova I. T., Leontievskii A. A. Biodegradation of organophosphorus pollutants by soil bacteria: biochemical aspects and unsolved problems. *Biotechnology*, 2020, vol. 36, no. 4, pp. 126–135. <https://doi.org/10.21519/0234-2758-2020-36-4-126-135>
7. Mikhailovskaya N. A. Quantitative estimation of potassium-mobilizing bacteria activity and their efficiency for winter rye cultivation. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2006, no. 3, pp. 41–46 (in Russian).

8. Lapa V. V., Mikhailovskaya N. A., Barashenko T. B. The effectiveness of bacterial fertilizer kaliplant on soddy-podzolic sandy loam soil with different sufficiency of moving potassium. *Agrokhimiya = Agrochemistry*, 2016, no. 6, pp. 29–38 (in Russian).
9. Mikhailovskaya N. A., Mikanova O., Barashenko T. B., Barashenko T. V. Activity of phosphate mobilization by rhizobacteria. *Pochvovedenie i Agrokhimiya = Soil Science and Agrochemistry*, 2007, no. 1 (38), pp. 225–231 (in Russian).
10. Mikhailovskaya N. A., Barashenko T. B. Antagonistic activity of rhizobacteria *A. brasilense* and *B. circulans* in respect of phytopathological micromycets *Fusarium* and *Alternaria*. *Pochvovedenie i Agrokhimiya = Soil Science and Agrochemistry*, 2019, no. 1 (62), pp. 234–244 (in Russian).
11. Mikhailovskaya N., Tchernysh A. K-mobilizing bacteria and their effect on wheat yield. *Agronomijas vestis = Latvian Journal of Agronomy*, 2005, vol. 8, pp. 147–150.
12. Mikhailovskaya N. A., Barashenko T. B., Pogirnikskaya T. V., Dusova S. V. Screening the capability of potassium mobilizing rhizobacteria to metabolise herbicide glyphosate. *Pochvovedenie i Agrokhimiya = Soil Science and Agrochemistry*, 2022, no. 1 (68), pp. 200–212 (in Russian). [https://doi.org/10.47612/0130-8475-2022-1\(68\)-200-212](https://doi.org/10.47612/0130-8475-2022-1(68)-200-212)
13. Zelenkova N. F., Vinokurova N. G. Determination of glyphosate and its biodegradation products by chromatographic methods. *Journal of Analytical Chemistry*, 2008, vol. 63, no. 9, pp. 871–874. <https://doi.org/10.1134/s106193480809013x>
14. Ragab M. T. H. Thin-layer chromatographic detection of glyphosate herbicide (N-phosphonomethyl glycine) and its aminomethyl phosphonic acid metabolite. *Chemosphere*, 1978, vol. 7, no. 2, pp. 143–153. [https://doi.org/10.1016/0045-6535\(78\)90041-3](https://doi.org/10.1016/0045-6535(78)90041-3)
15. Murphy J., Riley J. P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta*, 1962, vol. 27, pp. 31–36. [https://doi.org/10.1016/s0003-2670\(00\)88444-5](https://doi.org/10.1016/s0003-2670(00)88444-5)

Информация об авторах

Лапа Виталий Витальевич – академик, д-р с.-х. наук, профессор, гл. науч. сотрудник. Институт почвоведения и агрохимии НАН Беларуси (ул. Казинца, 90, 220108, Минск, Республика Беларусь). E-mail: bionf1@yandex.ru.

Михайловская Наталья Алексеевна – канд. с.-х. наук, доцент, заведующий лабораторией. Институт почвоведения и агрохимии НАН Беларуси (ул. Казинца, 90, 220108, Минск, Республика Беларусь). E-mail: bionf1@yandex.ru.

Погирницкая Татьяна Викторовна – мл. науч. сотрудник. Институт почвоведения и агрохимии НАН Беларуси (ул. Казинца, 90, 220108, Минск, Республика Беларусь). E-mail: bionf1@yandex.ru.

Information about the authors

Lapa Vitaly V. – Academician, D. Sc. (Agrarian), Professor, Chief Researcher. Institute for Soil Science and Agrochemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (90, Kazinets Str., 220108, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: bionf1@yandex.ru.

Mikhailovskaya Natalia A. – Ph. D. (Agrarian), Associate Professor, Head of the Laboratory. Institute for Soil Science and Agrochemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (90, Kazinets Str., 220108, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: bionf1@yandex.ru.

Pahirnikskaya Tatsiana V. – Junior Researcher. Institute for Soil Science and Agrochemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (90, Kazinets Str., 220108, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: bionf1@yandex.ru.