

ДОКЛАДЫ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ

МИНСК. БЕЛОРУССКАЯ НАУКА. 2019. ТОМ 63. № 2

Выходит шесть номеров в год

Журнал основан в июле 1957 года

Учредитель – Национальная академия наук Беларуси

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

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

Главный редактор

Владимир Григорьевич Гусаков

Председатель Президиума Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

Редакционная коллегия

С. А. Чижик

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

С. Я. Килин

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

А. В. Кильчевский

главный ученый секретарь Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь
(заместитель главного редактора)

Т. П. Петрович

(ведущий редактор журнала)

И. М. Богдевич – Институт почвоведения и агрохимии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

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

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

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

А. Е. Дайнеко – Институт мясо-молочной промышленности Научно-практического центра
Национальной академии наук Беларуси по продовольствию, Минск, Беларусь

О. А. Ивашкевич – Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Н. А. Изобов – Институт математики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

Н. С. Казак – Институт физики имени Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

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

Ф. Ф. Комаров – Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко
Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь

И. В. Котляров – Комиссия по опросам общественного мнения при Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Беларусь

В. А. Лабунов – Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь

А. П. Ласковнев – Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

- О. Н. Левко** – Институт истории Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь
В. Ф. Логин – Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь
А. А. Махнач – Научно-производственный центр по геологии, Минск, Беларусь
А. А. Михалевич – Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь
М. Е. Никифоров – Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь
В. А. Орлович – Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь
О. Г. Пенязков – Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь
Ю. М. Плескачевский – Президиум Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Беларусь
Н. С. Сердюченко – Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь
А. Ф. Смянович – Республиканский научно-практический центр неврологии и нейрохирургии, Минск, Беларусь
Л. М. Томильчик – Институт физики имени Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь
С. А. Усанов – Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь
Л. В. Хотылева – Институт генетики и цитологии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь
В. А. Хрипач – Институт биорганической химии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь
И. П. Шейко – Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по животноводству, Жодино, Беларусь

Редакционный совет

- К. П. Валуцкас** – Национальный институт рака, Вильнюс, Литва
С. Воденичаров – Болгарская академия наук, София, Болгария
И. М. Дунин – Всероссийский научно-исследовательский институт племенного дела
Министерства сельского хозяйства Российской Федерации, Лесные Поляны, Россия
Н. Желев – Медицинский биотехнологический центр молекулярной и клеточной технологии
Абертейского университета, Данди, Шотландия
Н. Н. Казанский – Институт лингвистических исследований Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия
А. Карклиньш – Институт почвоведения и растениеводства Латвийского сельскохозяйственного университета в Елгаве,
Елгава, Латвия
С. П. Карпов – Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия
М. Ларссон – Университетский центр Алба Нова Стокгольмского университета, Стокгольм, Швеция
А. Г. Наумовец – Национальная академия наук Украины, Киев, Украина
И. Д. Рашаль – Институт биологии Латвийского университета, Рига, Латвия
В. А. Садовничий – Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия
А. Г. Тарарико – Национальная академия аграрных наук Украины, Киев, Украина
Л. Трипольская – Литовский центр аграрных и лесных наук, Вильнюс, Литва
Тьяу Ван Минь – Вьетнамская академия наук и технологий, Ханой, Вьетнам
А. Цайлингер – Институт квантовой оптики и квантовой информатики Австрийской академии наук, Вена, Австрия
В. Ф. Чехун – Институт экспериментальной патологии, онкологии и радиологии имени Р. Е. Кавецкого
Национальной академии наук Украины, Киев, Украина
Чжао Лян – Хэнаньская академия наук, Хэнань, Китай

Адрес редакции:

*ул. Академическая, 1, к. 119, 220072, Минск, Республика Беларусь.
Тел.: +375 17 284-19-19; e-mail: doklady_nanb@mail.ru
doklady.belnauka.by*

ДОКЛАДЫ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ. 2019. Т. 63. № 2

Выходит на русском, белорусском и английском языках

Редактор Т. П. Петрович
Компьютерная верстка О. Л. Смольской

Сдано в набор 18.04.2019. Выпуск в свет 26.04.2019. Формат 60×84¹/₈. Бумага офсетная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 14,88. Уч.-изд. л. 16,4. Тираж 146 экз. Заказ 91.

Цена: индивидуальная подписка – 11,74 руб.; ведомственная подписка – 28,19 руб.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Республиканское унитарное предприятие «Издательский дом «Беларуская навука».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/18 от 02.08.2013. ЛП № 02330/455 от 30.12.2013. Ул. Ф. Скорины, 40, 220141, г. Минск.

© «Издательский дом «Беларуская навука».
Доклады НАН Беларуси, 2019

DOKLADY OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS

MINSK. BELARUSKAYA NAVUKA. 2019. Vol. 63. No. 2

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 Grigorievich Gusakov

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

Editorial Board

Sergey A. Chizhik

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

Sergey Ya. Kilin

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

Aleksandr V. Kilchevsky

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

Tatiana P. Petrovich

(*Lead editor*)

Iosiph M. Bogdevich – Institute for Soil Science and Agrochemistry of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Belarus

Alexey Ye. Daineko – Institute for Meat and Dairy Industry of the Scientific
and Practical Center for Foodstuffs of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

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

Oleg A. Ivashkevich – Belarusian State University, Minsk, Belarus

Nikolai A. Izobov – Institute of Mathematics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Nikolai S. Kazak – B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

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

Vladimir A. Khripach – Institute of Bioorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Fadei F. Komarov – A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of the Belarusian State University, Minsk, Belarus

Igor V. Kotlyarov – Commission for opinion polls of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Aleksandr A. Kovalenya – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Vladimir A. Labunov – Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

Aleksandr P. Laskovnev – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Olga N. Levko – Institute of History of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Vladimir F. Loginov – Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus
Anatoly A. Makhnach – Scientific and Practical Center on Geology, Minsk, Belarus
Aleksandr A. Mikhalevich – Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus
Mikhail Ye. Nikiforov – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus
Valentine A. Orlovich – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus
Oleg G. Penyazkov – A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus
Yury M. Pleskachevsky – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Belarus
Nikolai S. Serduchenko – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus
Ivan P. Sheiko – Scientific and Practical Center for Animal Breeding, Zhodino, Belarus
Arnold F. Smeyanovich – Republican Scientific and Practical Center of Neurology and Neurosurgery, Minsk, Belarus
Lev M. Tomilchik – B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus
Sergey A. Usanov – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus
Petr A. Vitiaz – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus
Igor D. Volotovskii – Institute of Biophysics and Cell Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Editorial Council

Chau Van Minh – Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi, Vietnam
Vasily F. Chekhun – Kavetsky Institute of Experimental Pathology, Oncology and Radiology of the National Academy of Sciences, Kiev, Ukraine
Ivan M. Dunin – All-Russian Scientific Research Institute of Breeding of the Ministry of Agriculture Economy of the Russian Federation, Lesnye Poliany, Russia
Aldis Karklinsh – Institute of Soil Science and Plant of the Latvia University of Agriculture in Elgava, Jelgava, Latvia
Sergey P. Karpov – Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
Nikolai N. Kazansky – Institute for Linguistic Studies of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia
Mats Larsson – Alba Nova University Center of the University of Stockholm, Stockholm, Sweden
Anton G. Naumovets – National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine
Isaak D. Rashal – Institute of Biology of the University of Latvia, Riga, Latvia
Viktor A. Sadovnichiy – Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
Aleksandr G. Tarariko – National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine
Ludmila Tripolskaya – Lithuanian Centre of Agricultural and Forest Sciences, Vilnius, Lithuania
Konstantinas P. Valuckas – National Cancer Institute, Vilnius, Lithuania
Stefan Vodenicharov – Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria
Anton Zeilinger – Institute for Quantum Optics and Quantum Information of the Austrian Academy of Sciences, Vienna, Austria
Zhao Liang – Henan Academy of Sciences, Henan, China
Nikolai Zhelev – Medical Biotechnology Center of Molecular and Cellular Technology of the Abertay University, Dundee, Scotland

Address of the Editorial Office:

*1, Akademicheskaya Str., room 119, 220072, Minsk, Republic of Belarus.
Phone: +375 17 284-19-19; e-mail: doklady_nanb@mail.ru
doklady.belnauka.by*

DOKLADY OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS. 2019. Vol. 63. No. 2

Printed in Russian, Belarusian and English languages

Editor T. P. Petrovich
Computer Imposition V. L. Smolskaya

Sent for press 18.04.2019. Output 26.04.2019. Format 60×84¹/₈. Offset paper.
Digital press. Printed sheets 14,88. Publisher's signatures 16,4. Circulation 146 copies. Order 91.
Price: individual subscription – 11,74 BYN, departmental subscription – 28,19 BYN.

Publisher and printing execution:

Republican unitary enterprise "Publishing House "Belaruskaya Navuka".
Certificate on the state registration of the publisher, manufacturer, distributor of printing editions
no. 1/18 dated of August 2, 2013. License for press no. 02330/455 dated of December 30, 2013.
40, F. Skorina Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus.

© RUE "Publishing House "Belaruskaya Navuka".
Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus, 2019

СОДЕРЖАНИЕ

МАТЕМАТИКА

- Берник В. И., Бударина Н. В., О’Доннелл Х.** Обобщение теоремы Хинчина для линейной комбинации аналитических линейно независимых функций 135
- Корзюк В. И., Столярчук И. И.** Решение смешанной задачи для уравнения типа Клейна–Гордона–Фока с интегральными условиями в случае неоднородных условий согласования 142
- Биньбинь Чжан, Ян Чэнь, Мартынов И. П.** О рациональных решениях двух дифференциальных уравнений с подвижной особой линией 150

ФИЗИКА

- Баглов А. В., Шевцова Т. А., Хорошко Л. С., Дудчик Н. В., Дроздова Е. В., Борисенко В. Е.** Формирование иммобилизованного наноструктурированного диоксида титана, обладающего антибактериальными свойствами 157

ХИМИЯ

- Косандрович Е. Г., Шаченкова Л. Н., Солдатов В. С.** Распределение аммиака, моно-, ди- и триэтиламина в системе «водный раствор–газовая фаза» 164
- Лемешонок С. Н., Чапланова Ж. Д., Агабеков В. Е., Иванова Н. А., Кухто И. Н.** Фотоизомеризация и фотоориентация бриллиантового желтого в тонкопленочном состоянии 169

БИОЛОГИЯ

- Пантелеев С. В., Баранов О. Ю., Головченко Л. А., Константинов А. В., Можаровская Л. В., Дишук Н. Г., Тимофеева В. А., Падутов В. Е.** Изучение видового состава микробиома фитофагов цветочных растений на основании данных ДНК-штрихкодирования 175
- Сапунова Л. И., Лобанок А. Г., Яцевич К. К., Кулиш С. А., Тамкович И. О., Ерхова Л. В., Сысолятин Е. Н.** Выделение, характеристика и молекулярно-генетическая идентификация нового штамма бактерий *Paenibacillus species* 181
- Терехова М. С., Григорьева Д. В., Горудко И. В., Семак И. В., Соколов А. В., Панасенко О. М., Черенкович С. Н.** Физико-химические свойства лактоферрина в условиях окислительного/галогенирующего стресса 189
- Чуешова Н. В., Висмонт Ф. И.** Влияние длительного воздействия электромагнитного излучения частоты мобильного телефона на морфофункциональное состояние репродуктивной системы крыс-самцов и их потомства 198

МЕДИЦИНА

- Митюкова Т. А., Леонова Т. А., Кохан С. Б., Сиваков А. А., Полулях О. Е.** Влияние супрессивной терапии левотироксином натрия на состояние сердечно-сосудистой и симпатoadренальной систем 207

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

- Аронов Г. А.** Особенности пространственно-временной сейсмической активности в Солигорском горно-промышленном регионе 216

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Гринчук П. С., Абухимд Х., Акулич А. В., Кияшко М. В., Соловей Д. В., Степкин М. О., Торопов В. В., Шашков М. Д., Хорт А. А., Лях М. Ю.** Высокотеплопроводная карбидокремниевая керамика для крупногабаритной космической оптики 223
- Руденская Н. А.** Ультрадисперсное упрочнение металлокерамических микрокомпозитов и покрытий, содержащих бориды переходных металлов, в потоке низкотемпературной плазмы 235

СОЦИАЛЬНО-ГУМАНИТАРНЫЕ НАУКИ

- Вертинская Т. С.** Интеграционная политика на субнациональном уровне в ЕАЭС: основные аспекты формирования 242

АГРАРНЫЕ НАУКИ

- Шейко И. П., Шейко Р. И., Янович Е. А., Приступа Н. В., Тимошенко Т. Н., Заяц В. Н., Аниховская В. Н., Капшевич К. А.** Новый высокопродуктивный заводской тип свиней «Приднепровский» в белорусской мясной породе 246

ISSN 1561-8323 (Print)

ISSN 2524-2431 (Online)

CONTENTS*MATHEMATICS*

- Bernik V. I., Budarina N. V., O'Donnell H.** Generalizing Khinchin's theorem to a linear combination of analytical linearly independent functions 135
- Korzyuk V. I., Stolyarchuk I. I.** Solving the mixed problem for the Klein–Gordon–Fock type equation with integral conditions in the case of the inhomogeneous matching conditions 142
- Bin-Bin Zhang, Yang Chen, Martynov I. P.** On rational solutions of two differential equations with a moving singular line 150

PHYSICS

- Baglov A. V., Shevtsova T. A., Khoroshko L. S., Dudchik N. V., Drozdova A. V., Borisenko V. E.** Forming immobilized nanostructured titanium dioxide having antibacterial properties 157

CHEMISTRY

- Kosandrovich E. G., Shachenkova L. N., Soldatov V. S.** Distribution of ammonia, mono-, di- and triethylamine in the water solution–gas phase system 164
- Lemiashonak S. N., Chaplanova Zh. D., Agabekov V. E., Ivanova N. A., Kukhta I. N.** Photoisomerization and photoorientation of brilliant yellow in the thin film state 169

BIOLOGY

- Pantelev S. V., Baranov O. Yu., Golovchenko L. A., Konstantinov A. V., Mozharovskaya L. V., Dishuk N. G., Timofeeva V. A., Padutov V. E.** Study of the microbiome species of the flowers phytophages based on the DNA-barcoding data 175
- Sapunova L. I., Lobanok A. G., Yatsevich K. K., Kulish S. A., Tamkovich I. A., Yarkhova L. V., Sysaliatsin Y. M.** Screening, characterization and molecular-genetic identification of a new bacterial strain *Paenibacillus* species 181
- Terekhova M. S., Grigorieva D. V., Gorudko I. V., Semak I. V., Sokolov A. V., Panasenko O. M., Cherenkevich S. N.** Physicochemical properties of lactoferrin under oxidative/halogenative stress 189
- Chueshova N. V., Vismont F. I.** Long-term effects of electromagnetic radiation of the mobile phone frequency on the morphofunctional state of the reproductive system of rats and males and their offspring 198

MEDICINE

- Mityukova T. A., Leonova T. A., Kochan S. B., Sivakov A. A., Polulyach O. E.** Effect of suppressive therapy with levothyroxine on the state of the cardiovascular and sympathoadrenal systems 207

EARTH SCIENCES

- Aronov G. A.** Features of the space – time distribution of the seismic activity within the Soligorsk mining region ... 216

TECHNICAL SCIENCES

- Grinchuk P. S., Abuhimd H., Akulich A. V., Kiyashko M. V., Solovei D. V., Stepkin M. O., Toropov V. V., Shashkov M. D., Khort A. A., Liakh M. Yu.** High thermal conductivity silicon-carbide ceramics for large-size space optics 223
- Rudenskaya N. A.** Ultradispersed hardening of metal-ceramic microcomposites and coatings containing borides of transition metals in a low-temperature plasma flow 235

SOCIAL SCIENCES AND HUMANITIES

- Vertinskaya T. S.** Integration policy at the subnational level in the EAEU: the main aspects of formation 242

AGRARIAN SCIENCES

- Sheyko I. P., Sheyko R. I., Yanovich E. A., Pristupa N. V., Timoshenko T. N., Zayats V. N., Anihovskaya I. V., Kapshevich K. A.** New highly productive plant type of pigs “Pridneprovsky” in the Belarusian meat breed 246

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

МАТЕМАТИКА

MATHEMATICS

УДК 411.42
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-2-135-141>

Поступило в редакцию 29.10.2018
Received 29.10.2018

В. И. Берник¹, Н. В. Бударина², Х. О’Доннелл³

¹Институт математики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

²Технологический институт, Дандолк, Ирландия

³Технологический институт Дублина, Дублин, Ирландия

ОБОБЩЕНИЕ ТЕОРЕМЫ ХИНЧИНА ДЛЯ ЛИНЕЙНОЙ КОМБИНАЦИИ АНАЛИТИЧЕСКИХ ЛИНЕЙНО НЕЗАВИСИМЫХ ФУНКЦИЙ

(Представлено членом-корреспондентом В. В. Гороховиком)

Аннотация. В 1998 г. Д. Клейнбок и Г. Маргулис доказали гипотезу В. Г. Спринджука: неравенство $|a_n f_n(x) + \dots + a_1 f_1(x) + a_0| < H^{-n-\varepsilon}$, $a_j \in \mathbb{Z}$, $0 \leq j \leq n$, $H = \max_{0 \leq j \leq n} |a_j|$, при любом $\varepsilon > 0$ имеет для почти всех x (в смысле меры Лебега) из интервала $I \subset \mathbb{R}$ лишь конечное число решений в целых числах a_j и невырожденных функциях $f_j(x)$. Они же вместе с В. Берсневичем и В. Берником заменили правую часть неравенства на $H^{-n-1}\psi(H)$ и для монотонно убывающей функции $\psi(H)$ со сходящимся рядом $\sum_{H=1}^{\infty} \psi(H)$ доказали аналог классической теоремы Хинчина о приближении действительных чисел рациональными. В данной работе мы обобщаем последний результат на аналитические функции $f_j(z)$, $z \in \mathbb{C}$.

Ключевые слова: аналитическая функция, диофантовы приближения, теорема Хинчина

Для цитирования. Берник, В. И. Обобщение теоремы Хинчина для линейной комбинации аналитических линейно независимых функций / В. И. Берник, Н. В. Бударина, Х. О’Доннелл // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2019. – Т. 63, № 2. – С. 135–141. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-2-135-141>

Vasili I. Bernik¹, Nataliya V. Budarina², Hugh O’Donnell³

¹Institute of Mathematics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

²Dundalk Institute of Technology, Dundalk, Ireland

³Dublin Institute of Technology, Dublin, Ireland

GENERALIZING KHINCHIN’S THEOREM TO A LINEAR COMBINATION OF ANALYTICAL LINEARLY INDEPENDENT FUNCTIONS

(Communicated by Corresponding Member Valentine V. Gorokhovich)

Abstract. Let $f_j(z)$, $1 \leq j \leq n$, be the analytic functions of a complex variable, together with 1 linearly independent over a field \mathbb{R} , and $\psi(x)$ be a monotonically decreasing function. Then the inequality $|a_n f_n(z) + \dots + a_1 f_1(z) + a_0| < H^{-\frac{n-2}{2}} \psi_3^{\frac{1}{2}}(H)$, $a_j \in \mathbb{Z}$, $0 \leq j \leq n$, $H = \max_{0 \leq j \leq n} |a_j|$, for convergence of the series $\sum_{H=1}^{\infty} \psi(H)$ has an infinite number of solutions in the vectors $(a_n, a_{n-1}, \dots, a_1, a_0)$ only for the set of Lebesgue measure zero. This improves the theorems of V. G. Sprindzhuk, D. Kleinbock, and G. Margulis.

Keywords: analytic function, diophantine approximation, Khinchin’s theorem

For citation: Bernik V. I., Budarina N. V., O’Donnell H. Generalizing Khinchin’s theorem to a linear combination of analytical linearly independent functions. *Doklady Natsional’noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2019, vol. 63, no. 2, pp. 135–141 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-2-135-141>

В 1924 г. А. Я. Хинчин [1] доказал метрическую теорему о значениях модуля разности $\left| \alpha - \frac{p}{q} \right|$ для действительного числа $\alpha \in \mathbb{R}$ и $(p, q) \in \mathbb{Z} \times \mathbb{N}$.

Т е о р е м а Х и н ч и н а. Пусть $\psi(x)$ – положительная монотонно убывающая функция, $I \subset \mathbb{R}$ – интервал на действительной прямой, μ – мера Лебега измеримого множества $A \subset \mathbb{R}$. Обозначим через $\mathcal{L}_1(\psi)$ множество $\alpha \in I$, для которых неравенства

$$\left| \alpha - \frac{p}{q} \right| < \frac{\psi(q)}{q}$$

или

$$|q\alpha - p| < \psi(q) \quad (1)$$

имеют бесконечное число решений в $(p, q) \in \mathbb{Z} \times \mathbb{N}$. Тогда

$$\mu \mathcal{L}_1(\psi) = \begin{cases} 0, & \sum_{q=1}^{\infty} \psi(q) < \infty, \\ \mu I, & \sum_{q=1}^{\infty} \psi(q) = \infty. \end{cases}$$

Заметим, что частный случай теоремы Хинчина при $\psi(q) = q^{-2}$ доказал Э. Борель, а в случае сходимости ряда требование монотонности функции $\psi(x)$ можно опустить. Левую часть неравенства (1) можно рассматривать как значение модуля линейной функции в точке α . Хинчин обобщил неравенство (1) на многочлены произвольной степени [2], доказав, что при любом $\varepsilon > 0$ неравенство

$$|P(x)| = |a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_1 x + a_0| < \varepsilon H^{-n} \quad (2)$$

имеет для почти всех x бесконечное число решений в многочленах $P(x)$ степени $\deg P = n$ и высоты $H = \max_{0 \leq j \leq n} |a_j|$. Систематическое исследование неравенства (2) началось после введения К. Малером [3] классификации действительных чисел и комплексных чисел.

Одной из центральных проблем классификации Малера стала метрическая проблема о мере множества S -чисел.

Обозначим через $\mathcal{L}_n(\psi)$ множество $x \in \mathbb{R}$, для которых неравенство

$$|P(x)| < \psi(H)$$

имеет бесконечное число решений в многочленах $P(x)$ вида (2). Малер предположил, что при $\psi(H) = H^{-w}$, $w > n$, множество $\mathcal{L}_n(\psi)$ имеет нулевую меру Лебега. Сам он доказал такое утверждение при $w > 4n$. В серии работ [4; 5] И. Кубилюс, Левек, В. Шмидт, Ф. Фолькман решили частные случаи проблемы Малера и довели неравенство для w до вида $w > \frac{4}{3}n$. Наконец, В. Г. Спринджук [6; 7] доказал гипотезу Малера, а также ее аналоги в полях комплексных и p -адических чисел. В [8; 9] было доказано, что

$$\mu \mathcal{L}_n(\psi) = \begin{cases} 0, & \sum_{H=1}^{\infty} \psi(q) < \infty, \\ \mu I, & \sum_{H=1}^{\infty} \psi(q) = \infty. \end{cases} \quad (3)$$

Утверждение (3) было обобщено в работах [10–12] с многочленов на линейные комбинации функций, а при $\psi(H) = H^{-w}$ и $w > n$ была найдена размерность Хаусдорфа $\dim \mu \mathcal{L}_n(\psi) = \frac{n+1}{w+1}$ [13; 14].

Обобщение неравенства в поле комплексных чисел было получено в [6; 7], а для аналитических функций Д. Клейнбок получил аналог гипотезы Спринджук [15].

Т е о р е м а 1. Пусть $f_j(z), 1 \leq j \leq n$, – аналитические функции и $1, f_1(z), \dots, f_n(z)$ линейно-независимы над \mathbb{R} . Тогда неравенство

$$|F_n(z)| = |a_n f_n(z) + \dots + a_1 f_1(z) + a_0| < H^{-\frac{n-1}{2}-\varepsilon} \tag{4}$$

имеет для почти всех $z \in \mathbb{C}$ лишь конечное число решений в векторах $\bar{a} = (a_n, a_{n-1}, \dots, a_1, a_0) \in \mathbb{Z}^{n+1}$.

Приведем рассуждение, которое позволяет в правой части неравенства (4) поставить функцию $H^{-\frac{n-2}{2}} \psi_1^{\frac{1}{2}}(H)$, где функция $\psi_1(H)$ монотонно убывает и ряд $\sum_{H=1}^{\infty} \psi_1(H)$ сходится. Сделаем замену переменной $f_1(z) = u, f_j(z) = f_j(f_1^{-1}(u)), 2 \leq j \leq n$. Чтобы не менять обозначения будем считать, что первоначальные заданные функции имеют вид $z, f_2(z), \dots, f_n(z)$ и вместе с 1 линейно-независимы над \mathbb{R} . Докажем следующее утверждение.

Т е о р е м а 2. Обозначим через $M_n(\psi_1)$ множество $z \in \mathbb{C}$, для которых система неравенств

$$|F_n(z)| < H^{-\frac{n-2}{2}} \psi_1^{\frac{1}{2}}(z), \quad H^{\frac{5}{8}} < |F'_n(z)| < c_1 H \tag{5}$$

имеет бесконечное число решений в векторах \bar{a} .

Д о к а з а т е л ь с т в о. Ясно, что теорема будет доказана, если мы установим ее для любого круга в \mathbb{C} . Возьмем единичный круг $K = K(0, 1)$ с центром в нуле единичного радиуса. Для функции $F_n(z)$ возьмем такую точку $\alpha_1 \in K(0, 1)$, чтобы в ней выполнялись неравенства (5) и такую, чтобы на всем множестве B_1 решений (5) выполнялось равенство $\min_{\alpha_1 \in B_1} |F_n(z)| = F(\alpha_1)$.

Построим два круга $\sigma(F)$ и $\sigma_1(F)$, радиусы которых равны правым частям следующих неравенств:

$$\begin{aligned} \sigma(F) &= \left\{ z = K : |z - \alpha_1| < c_2 H^{-\frac{n-2}{2}} |F'(\alpha_1)|^{-1} \right\}, \\ \sigma_1(F) &= \left\{ z = K : |z - \alpha_1| < c_3 |F'(\alpha_1)|^{-1} \right\}. \end{aligned} \tag{6}$$

Очевидно, что

$$\mu\sigma(F) < (c_2 c_3^{-1})^2 H^{-(n-2)} \mu\sigma_1(F).$$

Согласно лемме из [7; 9] круг $\sigma(F)$ содержит все решения (5), для которых α_1 ближайшая к z точка. Покажем, что круги $\sigma_1(F_1), \sigma_1(F_2)$ при подходящем выборе c_3 не пересекаются для различных функций $F_1(z)$ и $F_2(z)$ высоты $\max\{H(F_1), H(F_2)\} \leq Q$, у которых совпадают коэффициенты a_n, \dots, a_2 .

Разложим каждую из функций $F_j(z), j = 1, 2$, в точке α_{1j} в ряд Тейлора в круге (6). Получим

$$F_j(z) = F_j(\alpha_{1j}) + F'_j(\alpha_{1j})(z - \alpha_{1j}) + \sum_{k=2}^{\infty} (k!)^{-1} F^{(k)}(\alpha_{1j})(z - \alpha_{1j})^k. \tag{7}$$

Так как

$$|z - \alpha_{1j}| < c_3 |F'(\alpha_{1j})|^{-1} < c_3 H^{\frac{5}{8}},$$

и при достаточно большом H

$$\left| \sum_{k=2}^{\infty} (k!)^{-1} F^{(k)}(\alpha_{1j})(z - \alpha_{1j})^k \right| \leq c_3 H^{-\frac{1}{4}},$$

то из (7) получаем

$$|F_j(z)| < 2c_3.$$

Зафиксируем вектор $\bar{b} = (a_n, \dots, a_2)$. Одна из этих координат равна H , а остальные $n - 2$ координаты заключены в интервале $-H \leq a_j \leq H$ и принимают $(2H + 1)^{n-2}$ значений. Если z_0 есть точка пересечения двух кругов $\sigma_1(F_1)$ и $\sigma_1(F_2)$ с одним и тем же вектором \bar{b} , то выполняются оба неравенства (5). Рассмотрим функцию

$$R(z) = F_2(z) - F_1(z) = (a_{12} - a_{11})z + a_{02} - a_{01} = d_1z + d_0, |d_j| \leq 2H, d_j \in \mathbb{Z}.$$

Мнимая или действительная часть этой функции в точке z_0 по модулю не меньше единицы. Это означает $|R(z)| \geq 1$, что при $c_3 < 0,5$ противоречиво.

Если круги $\sigma_1(F_1)$ и $\sigma_1(F_2)$ не пересекаются, то

$$\sum_{F \in \mathcal{F}(\bar{b})} \mu \sigma_1(F_1) \leq \mu C(0, 1) = \pi.$$

Поэтому

$$\sum_{\bar{b}} \sum_{F \in \mathcal{F}(\bar{b})} \mu \sigma_1(F_1) < c_4 H^{n-2} H^{-n+2} \psi_1(H) = c_4 \psi_1(H). \quad (8)$$

Ряд, составленный из правых частей неравенства (8), по условию теоремы 2 сходится и поэтому по известной лемме Бореля–Кантелли заключаем, что множество $M_n(\psi_1)$ имеет нулевую меру. При условии $|F'_n(z)| \leq H^{\frac{5}{8}}$ в (5) используется метод Спринджук [7].

Случай расходимости. Все теоремы, являющиеся аналогами теоремы Хинчина о расходимости на многообразиях, используют понятие регулярной системы счетного множества точек. Это понятие было введено в 1970 г. Бейкером и Шмидтом [13].

Счетное множество точек $\Gamma = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_t, \dots)$ вместе с заданной на Γ функцией $f(\beta_j)$ называется регулярной системой, если для любого интервала I найдется такое число $T_0 = T_0(I)$, что для всех $T > T_0$ можно выбрать t чисел $\beta_j, 1 \leq j \leq t$, из $G_1 = \Gamma \cap I$, удовлетворяющих следующим условиям:

1. $N(\beta_j) < T, 1 \leq j \leq t$;
2. $|\beta_i - \beta_j| \geq T^{-1}, 1 \leq i < j \leq t$;
3. $t > dT\mu I$, для некоторого $0 \leq d < 1$.

Бейкер и Шмидт доказали, что действительные алгебраические числа вместе с функцией $N(\alpha_j) = (H(\alpha_j))^{n+1} \log^{-\gamma} H, \gamma = 3n(n+1)$ образуют регулярную систему.

Этот результат был использован при получении оценки снизу размерности Хаусдорфа множества действительных чисел x , для которых неравенство

$$|x - \alpha| < (H(\alpha))^{-w}, w > n,$$

имеет бесконечное число решений в алгебраических числах α степени n . Оценка снизу была получена для любых регулярных систем и действительных чисел, удовлетворяющих неравенству вида (5) с β_j из регулярной системы.

Однако для доказательства аналога теоремы Хинчина в случае расходимости свойства регулярности недостаточно. Необходимо доказать регулярность при $\gamma = 0$. Для алгебраических чисел такой результат был получен в [8], а в работе [11] регулярность нулей линейных комбинаций невырожденных функций была доказана с $\gamma = 0$, что позволило в общем случае получить аналог теоремы Хинчина в случае расходимости. Вместе с результатами [11; 12] и [10] приходим к следующему утверждению.

Пусть невырожденные функции $f_1(x), \dots, f_n(x)$ дифференцируемы $n + 1$ раз и

$$F_n(x) = a_n f_n(x) + \dots + a_1 f_1(x) + a_0.$$

Обозначим через $K(\psi_2)$ множество x из интервала J , для которых неравенство

$$|F_n(x)| < H^{-n+1} \psi_2(H)$$

имеет бесконечное число решений в функциях $F_n(x)$.

Т е о р е м а 3. *Справедливо равенство*

$$\mu K(\psi_2) = \begin{cases} 0, & \sum_{H=1}^{\infty} \psi_2(H) < \infty \\ \mu J, & \sum_{H=1}^{\infty} \psi_2(H) = \infty. \end{cases}$$

В настоящей работе мы получаем обобщение теоремы 3 на комплексно-значные аналитические функции в \mathbb{C} .

Пусть $f_1(z), \dots, f_n(z)$ аналитические функции и $1, f_1(z), \dots, f_n(z)$ линейно независимы над \mathbb{R} . Обозначим через $K(\psi_3)$ для монотонно убывающей функции $\psi_3(x), x > 0$, множество z из круга $C(z_0, r)$, для которых неравенство

$$|F_n(z)| = |a_n f_n(z) + \dots + a_1 f_1(z) + a_0| < H^{-\frac{n-2}{2}} \psi_3^{\frac{1}{2}}(H) \tag{9}$$

имеет бесконечное число решений в векторах \bar{a} .

Т е о р е м а 4. *Имеет место равенство*

$$\mu K(\psi_3) = \begin{cases} 0, & \sum_{H=1}^{\infty} \psi_3(H) < \infty \\ \mu C(z_0, r), & \sum_{H=1}^{\infty} \psi_3(H) = \infty. \end{cases} \tag{10}$$

$$\tag{11}$$

Доказательство утверждения (10) разбивается на два этапа. На первом этапе к неравенству (9) добавляется неравенство

$$H^{\frac{5}{8}} < |F'(z)| < c_5 H$$

и доказательство аналогично теореме 2. На втором этапе — $|F'(z)| < H^{\frac{5}{8}}$. В силу монотонности функции $\psi_3(x)$ можно ослабить неравенство (9) до неравенства

$$|F_n(z)| < c_6 H^{-\frac{n-1}{2}} \tag{12}$$

и воспользоваться теоремой Клейнбока, поскольку сумма показателей аппроксимации $|F_n(z)|$ и $|F'_n(z)|$ равна $-\frac{n-1}{2} + \frac{5}{8} = -\frac{4n-9}{8}$. Это позволяет с запасом оценить меру в системе неравенств $|F'(z)| < H^{\frac{5}{8}}$ и (12).

Аналогично теореме 4 можно установить следующий факт.

Пусть функция $F_n(z)$ удовлетворяет условиям теоремы 4. Обозначим через $B_1(\delta_0)$ множество $z \in C(z_0, r)$, для которых система неравенств

$$|F_n(z)| < Q^{-\frac{n-1}{2}}, \quad |F'(z)| < \delta_0 Q$$

имеет хотя бы одно решение в функциях $F_n(z), H(F_n) \leq Q$.

Т е о р е м а 5. Существует $\delta_0 = \delta_0(n)$, при котором

$$\mu B_1(\delta_0) < \frac{1}{4} \mu C(z_0, r).$$

Из теоремы 5 следует, что на множестве $B_2 = C(z_0, r) \setminus B_1(\delta_0)$ система неравенств

$$|F_n(z)| < Q^{-\frac{n-1}{2}}, \quad |F'(z)| \geq \delta_0 Q \quad (13)$$

выполняется и

$$\mu B_3 \geq \frac{3}{4} \mu C(z_0, r). \quad (14)$$

Из (14) и леммы Клейнбока [15] следует, что существует корень β_1 в круге $C_1 \subset C(z_0, r)$ с мерой $\mu C_1 < c_7 Q^{-n-1}$ и $|z - \beta_1| < c_7 Q^{-n-1}$. Исключим этот круг из B_2 и на множестве $B_2 \setminus C_1$ найдем точку z_2 , в которой выполняется система (13). Затем в круге C_2 с площадью $\mu C_2 < c_8 Q^{-n-1}$ найдем новый корень β_2 функции $F_n(z)$. Эту процедуру можно продолжать до тех пор, пока кругами C_j не покроем $\frac{3}{4}$ меры круга $C(z_0, r)$. Для этого понадобится не менее $t > \frac{3}{4} Q^{n+1} \mu C(z_0, r)$ шагов. Из построенных нулей выберем максимальную систему нулей, как в [13], находящихся друг от друга на расстоянии $c_9 Q^{-\frac{n-1}{2}}$. Это множество нулей образует регулярную систему, что позволяет доказать (11), как в [8; 11].

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ (проект Ф17-101).

Acknowledgements. This research was supported by BRFFR (project Ф17-101).

Список использованных источников

1. Khintchine, A. Einige Sätze über Kettenbrüche, mit Anwendungen auf die Theorie der Diophantischen Approximationen / A. Khintchine // *Mathematische Annalen*. – 1924. – Vol. 92, N 1–2. – P. 115–125. <https://doi.org/10.1007/bf01448437>
2. Khintchine, A. Über eine Klasse linear diophantischer Approximationen. *Rendiconti* / A. Khinchine // *Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo*. – 1926. – Vol. 50, N 2. – P. 170–195. <https://doi.org/10.1007/bf03014726>
3. Mahler, K. Über das Maß der Menge aller S-Zahlen / K. Mahler // *Mathematische Annalen*. – 1932. – Vol. 106, N 1. – P. 131–139. <https://doi.org/10.1007/bf01455882>
4. Кубиллос, И. О применении метода И. М. Виноградова к решению одной задачи метрической теории чисел // *Докл. Акад. наук СССР*. – 1949. – Т. 67, № 5. – С. 783–786.
5. Volkmann, B. The real cubic case of Mahler's conjecture / B. Volkmann // *Mathematika*. – 1961. – Vol. 8, N 1. – P. 55–57. <https://doi.org/10.1112/s0025579300002126>
6. Спринджук, В. Г. Доказательство гипотезы Малера о мере множества S-чисел // *Изв. Академии наук СССР. Сер. математическая*. – 1965. – Т. 29, № 2. – С. 379–436.
7. Спринджук, В. Г. Проблема Малера в метрической теории чисел / В. Г. Спринджук. – Минск, 1967. – 184 с.
8. The Khintchine–Groshev Theorem for Planar Curves / V. Beresnevich [et al.] // *Proc. Royal Society of London. Ser. A: Math., Phys. and Engin. Sci.* – 1999. – Vol. 455, N 1988. – P. 3053–3063. <https://doi.org/10.1098/rspa.1999.0439>
9. Берник, В. И. О точном порядке приближения нуля значениями целочисленных многочленов / В. И. Берник // *Acta Arithmetica*. – 1989. – Т. 53, № 1. – С. 17–28.

10. Beresnevich, V. A Baker's conjecture and Hausdorff dimension / V. Beresnevich, V. Bernik // *Publicationes Mathematicae Debrecen*. – 2000. – Vol. 54, N 3–4. – P. 263–269.
11. Metric Diophantine approximation: The Kleinbock–Groshev theorem for nondegenerate manifolds / V. Beresnevich [et al.] // *Moscow Mathematical Journal*. – 2002. – Vol. 2, N 2. – P. 203–225. <https://doi.org/10.17323/1609-4514-2002-2-2-203-225>
12. Bernik, V. Khintchine-type theorems on manifolds: the convergence case for standard and multiplicative versions / V. Bernik, D. Kleinbock, G. Margulis // *International Mathematics Research Notices*. – 2001. – Vol. 2001, N 9. – P. 453–486. <https://doi.org/10.1155/s1073792801000241>
13. Baker, A. Diophantine approximation and Hausdorff dimension / A. Baker, W. Schmidt // *Proceedings of the London Mathematical Society*. – 1970. – Vol. s3-21, N 1. – P. 1–11. <https://doi.org/10.1112/plms/s3-21.1.1>
14. Берник, В. И. Применение размерности Хаусдорфа в теории диофантовых приближений / В. И. Берник // *Acta Arithmetica*. – 1983. – Т. 42, № 3. – С. 219–253.
15. Kleinbock, D. Sprindžuk conjectures for complex analytic manifolds. Algebraic groups / D. Kleinbock, A. Baker // *Tata Institute of Fundamental Research*. – Mumbai, 2004. – P. 539–553.

References

1. Khintchine A. Einige Sätze über Kettenbrüche, mit Anwendungen auf die Theorie der Diophantischen Approximationen. *Mathematische Annalen*, 1924, vol. 92, no. 1–2, pp. 115–125 (in German). <https://doi.org/10.1007/bf01448437>
2. Khintchine A. Über eine Klasse linear diophantischer Approximationen. *Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo*, 1926, vol. 50, no. 2, pp. 170–195 (in German). <https://doi.org/10.1007/bf03014726>
3. Mahler K. Über das Maß der Menge aller S-Zahlen. *Mathematische Annalen*, 1932, Vol. 106, no. 1, pp. 131–139 (in German). <https://doi.org/10.1007/bf01455882>
4. Kubilius J. On an application of I. M. Vinogradov's method to the solution of a problem of the metrical theory of numbers. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 1949, vol. 67, no. 5, pp. 783–786 (in Russian).
5. Volkmann B. The real cubic case of Mahler's conjecture. *Mathematika*, 1961, vol. 8, no. 1, pp. 55–57. <https://doi.org/10.1112/s0025579300002126>
6. Sprindžuk V. A proof of Mahler's conjecture on measure of the set of S-numbers. *Izvestiya Akademii nauk, seriya matematicheskaya*, 1965, vol. 29, pp. 379–436.
7. Sprindžuk V. G. *The problem of Mahler in metric number theory*. Minsk, 1967. 184 p. (in Russian).
8. Beresnevich V., Bernik V., Dickinson H., Dodson M. The Khintchine–Groshev Theorem for Planar Curves. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1999, vol. 455, no. 1988, pp. 3053–3063. <https://doi.org/10.1098/rspa.1999.0439>
9. Bernik V. I. On the exact order of approximation to zero with values of integral polynomials. *Acta Arithmetica*, 1989, vol. 53, no. 1, pp. 17–28 (in Russian).
10. Beresnevich V., Bernik V. A Baker's conjecture and Hausdorff dimension. *Publicationes Mathematicae Debrecen*, 2000, vol. 54, no. 3–4, pp. 263–269.
11. Beresnevich V., Bernik V., Kleinbock D., Margulis G. Metric Diophantine approximation: The Kleinbock–Groshev theorem for nondegenerate manifolds. *Moscow Mathematical Journal*, 2002, vol. 2, no. 2, pp. 203–225. <https://doi.org/10.17323/1609-4514-2002-2-2-203-225>
12. Bernik V., Kleinbock D., Margulis G. Khintchine-type theorems on manifolds: the convergence case for standard and multiplicative versions. *International Mathematics Research Notices*, 2001, vol. 2001, no. 9, pp. 453–486. <https://doi.org/10.1155/s1073792801000241>
13. Baker A., Schmidt W. Diophantine approximation and Hausdorff dimension. *Proceedings of the London Mathematical Society*, 1970, vol. s3-21, no 1, pp. 1–11. <https://doi.org/10.1112/plms/s3-21.1.1>
14. Bernik V. I. Application of the Hausdorff dimension in the theory of Diophantine approximations. *Acta Arithmetica*, 1983, vol. 42, no. 3, pp. 219–253 (in Russian).
15. Kleinbock D., Backer A. Sprindžuk conjectures for complex analytic manifolds. Algebraic groups. *Tata Institute of Fundamental Research*, Mumbai, 2004, pp. 539–553.

Информация об авторах

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

Бударина Наталья Викторовна – д-р физ.-мат. наук. Технологический институт (A91 K584, Дублин Роуд, Дан-долк, Ирландия). E-mail: Natalia.Bударина@maths.nuim.ie.

О'Доннелл Хьюг – канд. физ.-мат. наук, Технологический институт Дублина (D02 HW71, ул. Ангер, Дублин, Ирландия). E-mail: hugh.odonnell@nuim.ie.

Information about the authors

Bernik Vasily Ivanovich – D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Chief researcher. Institute of Mathematics of the National Academy of Sciences of Belarus (11, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: bernik@im.bas-net.by.

Budarina Nataliya Viktorovna – D. Sc. (Physics and Mathematics). Dundalk Institute of Technology (A91 K584, Dublin Road, Dundalk, Ireland). E-mail: Natalia.Bударина@maths.nuim.ie.

O'Donnell Hugh – Ph. D. (Physics and Mathematics). Dublin Institute of Technology (D02 HW71, Aungier Str., Dublin, Ireland). E-mail: hugh.odonnell@nuim.ie.

ISSN 1561-8323 (Print)

ISSN 2524-2431 (Online)

УДК 517.958

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-2-142-149>

Поступило в редакцию 18.02.2018

Received 18.02.2018

Академик В. И. Корзюк¹, И. И. Столярчук²¹*Институт математики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь*²*Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь***РЕШЕНИЕ СМЕШАННОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ УРАВНЕНИЯ ТИПА КЛЕЙНА–ГОРДОНА–ФОКА С ИНТЕГРАЛЬНЫМИ УСЛОВИЯМИ В СЛУЧАЕ НЕОДНОРОДНЫХ УСЛОВИЙ СОГЛАСОВАНИЯ**

Аннотация. В данном сообщении рассматривается классическое решение смешанной задачи с интегральными условиями для уравнения типа Клейна–Гордона–Фока в полуполосе в случае, когда выполняются неоднородные условия согласования. Для рассматриваемой задачи строится эквивалентная задача сопряжения, в которой условия сопряжения задаются на характеристиках. Построенные неоднородные условия согласования однозначно определяют величину разрывов решения или его производных на характеристиках. Данные разрывы могут как сохраняться, так и сглаживаться с ростом аргумента по времени в зависимости от ядра интегрального оператора в нелокальных условиях. При решении указанной задачи возникают эквивалентные интегральные уравнения Вольтерры второго рода и их системы. Для полученных интегральных уравнений и систем существует единственное решение в классе дважды непрерывно дифференцируемых функций при заданной гладкости данных. При рассмотрении задачи использовался метод характеристик, который позволяет строить как точные, так и приближенные решения. Точные решения могут быть найдены в том случае, если удастся разрешить эквивалентные интегральные уравнения Вольтерры. В противном случае можно найти приближенное решение задачи либо в аналитическом, либо в численном виде. При построении приближенного решения существенными оказываются условия согласования, которые необходимо учитывать при использовании численных методов решения задачи.

Ключевые слова: уравнение Клейна–Гордона–Фока, метод характеристик, условия сопряжения, классическое решение, смешанная задача, условия согласования

Для цитирования. Корзюк, В. И. Решение смешанной задачи для уравнения типа Клейна–Гордона–Фока с интегральными условиями в случае неоднородных условий согласования / В. И. Корзюк, И. И. Столярчук // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2019. – Т. 63, № 2. – С. 142–149. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-2-142-149>

Academician Viktor I. Korzyuk¹, Ivan I. Stolyarchuk²¹*Institute of Mathematics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*²*Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus***SOLVING THE MIXED PROBLEM FOR THE KLEIN–GORDON–FOCK TYPE EQUATION WITH INTEGRAL CONDITIONS IN THE CASE OF THE INHOMOGENEOUS MATCHING CONDITIONS**

Abstract. The classical solution of the mixed problem with integral conditions for the Klein–Gordon–Fock type equation in the half strip is considered when inhomogeneous matching conditions are fulfilled. An equivalent conjugation problem is formulated where conjugation conditions are set on characteristics. Constructed inhomogeneous conditions uniquely define gaps of the solution or its derivatives on characteristics and given gaps can be either remained or smoothed while the time argument increases depending on the kernel of the integral operator in unlocal conditions. The solution of this problem is reduced to solving the second-type Volterra integral equations and their systems. The unique solution of these equations in the class of the twice continuously differentiable functions exists when the initial functions are smooth enough. While considering the given problem the method of characteristics is used to construct both an analytical solution, when the solution of the integral equation can be found explicitly, and an approximate solution. Moreover, approximate solutions can be constructed in numerical and analytical form. When the numerical solution is constructed, matching conditions are significant and need to be considered while developing numerical methods.

Keywords: Klein–Gordon–Fock equation, characteristics method, conjugation conditions, classical solution, mixed problem, matching conditions

For citation: Korzyuk V. I., Stolyarchuk I. I. Solving the mixed problem for the Klein–Gordon–Fock type equation with integral conditions in the case of the inhomogeneous matching conditions. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2019, vol. 63, no. 2, pp. 142–149 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-2-142-149>

Введение. В [1–5] с помощью метода характеристик исследуются различные смешанные задачи для уравнения Клейна–Гордона–Фока. Для каждой из рассматриваемых задач получены условия согласования, которые при достаточной гладкости заданных функций являются необходимыми и достаточными условиями для принадлежности решения классу дважды непрерывно дифференцируемых функций.

В [6, с. 13–20] рассмотрен случай неоднородных условий согласования для первой смешанной задачи волнового уравнения. В результате была поставлена корректная задача сопряжения, доказано существование и единственность классического решения первой смешанной задачи в случае, когда выполняются неоднородные условия согласования.

В данном сообщении метод характеристик применяется для изучения неоднородных условий согласования смешанной задачи для уравнения Клейна–Гордона–Фока с нелокальными условиями.

Постановка задачи. Задача рассматривается на плоскости двух независимых переменных t, x . На замыкании \bar{Q} области $Q = (0; l) \times \mathbb{R}^+$, $l \in \mathbb{R}, l < +\infty$, задается одномерное уравнение типа Клейна–Гордона–Фока

$$Lv = L^{(0)}v - \lambda(t, x)v = \partial_t^2 v - a^2 \partial_x^2 v - \lambda(t, x)v = f(t, x), \quad (1)$$

где λ и f – функции, заданные на множестве $\bar{Q} = [0; \infty) \times [0; l] \subset \mathbb{R}^2 = \mathbb{R} \times \mathbb{R}$; \mathbb{R} – множество действительных чисел.

С помощью прямых $t = kl/a, k = 0, 1, \dots$, область Q разбивается на подобласти $Q^{(k)}$. Далее с помощью характеристик $x - at = -kl, x + at = (k + 1)l, k = 0, 1, \dots$, каждая из подобластей $Q^{(k)}$ разбивается на непересекающиеся подмножества $Q^{(k,j)}$, такие, что $\bar{Q} = \bigcup_{k=0}^{\infty} \bigcup_{j=1}^4 \bar{Q}^{(k,j)}$.

К уравнению (1) присоединяются условия Коши

$$v(0, x) = \varphi(x), \partial_t v(0, x) = \psi(x), \quad x \in [0; l], \quad (2)$$

и нелокальные условия

$$v(t, j) = \int_0^l K_j(t, s)v(t, s)ds + \widetilde{q}^{(j)}(t), \quad t \in [0; \infty), j \in \{0, l\}, \quad (3)$$

где $K_j(t, x), \widetilde{q}^{(j)}(t), j \in \{0, l\}$, $\varphi(x), \psi(x)$ – некоторые наперед заданные функции, гладкость которых будет уточнена ниже.

Как было показано в [4; 5], задача (1)–(3) сводится к решению задачи для однородного уравнения

$$\partial_t^2 u - a^2 \partial_x^2 u - \lambda(t, x)u = 0, \quad (4)$$

$$u(0, x) = \varphi(x), \partial_t u(0, x) = \psi(x), \quad x \in [0; l], \quad (5)$$

$$u(t, j) = \int_0^l K_j(t, s)u(t, s)ds + q^{(j)}(t), \quad t \in [0; \infty), j \in \{0, l\}, \quad (6)$$

где $q^{(j)}(t) = \widetilde{q}^{(j)}(t) - \int_0^l K_j(t, s)w(t, s)ds - w(t, j), j \in \{0, l\}$. Здесь $w(t, j)$ – решение следующей задачи для неоднородного уравнения

$$\partial_t^2 w - a^2 \partial_x^2 w - \lambda(t, x)w = f(t, x) \quad (7)$$

с однородными начальными условиями

$$w(0, x) = 0, \partial_t w(0, x) = 0, \quad x \in [0; l]. \quad (8)$$

Доказательство существования дважды непрерывно дифференцируемого решения задачи (7)–(8) приведено в [5].

В [4; 5] была доказана теорема

Т е о р е м а 1. Пусть $\lambda \in C^1(\overline{Q})$, $q^{(j)} \in C^2([0; +\infty))$, $K_j \in C^2(\overline{Q})$, $j \in \{0, l\}$, $\varphi \in C^2([0; l])$, $\psi \in C^1([0; l])$. Решение задачи (4)–(6) существует и единственно в классе $C^2(\overline{Q})$ тогда и только тогда, когда выполняются однородные условия согласования

$$\begin{aligned} q^{(0)}(0) - \varphi(0) + \int_0^l K_0(0, s)\varphi(s)ds = 0, \quad q^{(l)}(0) - \varphi(l) + \int_0^l K_l(0, s)\varphi(s)ds = 0, \\ -\frac{1}{a}dq^{(0)}(0) + \frac{1}{a}\psi(0) - \frac{1}{a}\int_0^l (\partial_t K_0(0, s)\varphi(s) + \psi(s)K_0(0, s))ds = 0, \\ \frac{1}{a}dq^{(l)}(0) - \frac{1}{a}\psi(l) - \frac{1}{a}\int_0^l (\partial_t K_l(0, s)\varphi(s) + \psi(s)K_l(0, s))ds = 0, \\ \frac{1}{a^2}d^2q^{(0)}(0) - d^2\varphi(0) - \frac{1}{a^2}\varphi(0)\lambda(0, 0) + \\ + \frac{1}{a^2}\int_0^l (\partial_t^2 K_0(0, s)\varphi(s) + 2\partial_t K_0(0, s)\psi(s) + K_0(0, s)(a^2 d^2\varphi(s) + \varphi(s)\lambda(0, s)))ds = 0, \\ \frac{1}{a^2}d^2q^{(l)}(0) - d^2\varphi(l) - \frac{1}{a^2}\varphi(l)\lambda(0, l) + \\ + \frac{1}{a^2}\int_0^l (\partial_t^2 K_l(0, s)\varphi(s) + 2\partial_t K_l(0, s)\psi(s) + K_l(0, s)(a^2 d^2\varphi(s) + \varphi(s)\lambda(0, s)))ds = 0. \end{aligned}$$

При этом решение $u(t, x)$ задачи (4)–(6) определяется как $u(t, x) = u^{(k)}(t, x)$, $(t, x) \in \overline{Q^{(k)}}$, где $u^{(k)}(t, x)$ задается формулой

$$u^{(k)}(t, x) = -\frac{1}{4a^2} \int_{-kl}^{x-at} \int_{(k+1)l}^{x+at} (\lambda u^{(k)}) \left(\frac{\eta - \xi}{2a}, \frac{\eta + \xi}{2} \right) d\eta d\xi + p^{(k)}(x - at) + g^{(k)}(x + at) \quad (9)$$

при соответствующем выборе значений функций $p^{(k)}$, $g^{(k)}$, $k = 0, 1, \dots$.

Неоднородные условия согласования. Рассмотрим неоднородные условия согласования в области $Q^{(k)}$

$$\begin{aligned} q^{(0)}\left(\frac{kl}{a}\right) - \varphi^{(k)}(0) + \int_0^l K_0\left(\frac{kl}{a}, s\right)\varphi^{(k)}(s)ds = \sigma_0^{(k)}, \quad q^{(l)}\left(\frac{kl}{a}\right) - \varphi^{(k)}(l) + \int_0^l K_l\left(\frac{kl}{a}, s\right)\varphi^{(k)}(s)ds = \delta_0^{(k)}, \\ -\frac{1}{a}dq^{(0)}\left(\frac{kl}{a}\right) + \frac{1}{a}\psi^{(k)}(0) - \frac{1}{a}\int_0^l \left(\partial_t K_0\left(\frac{kl}{a}, s\right)\varphi^{(k)}(s) + \psi^{(k)}(s)K_0\left(\frac{kl}{a}, s\right) \right) ds = \sigma_1^{(k)}, \\ \frac{1}{a}dq^{(l)}\left(\frac{kl}{a}\right) - \frac{1}{a}\psi^{(k)}(l) - \frac{1}{a}\int_0^l \left(\partial_t K_l\left(\frac{kl}{a}, s\right)\varphi^{(k)}(s) + \psi^{(k)}(s)K_l\left(\frac{kl}{a}, s\right) \right) ds = \delta_1^{(k)}, \\ \frac{1}{a^2}d^2q^{(0)}\left(\frac{kl}{a}\right) - d^2\varphi^{(k)}(0) - \frac{1}{a^2}\varphi^{(k)}(0)\lambda\left(\frac{kl}{a}, 0\right) + \\ + \frac{1}{a^2}\int_0^l \left(\partial_t^2 K_0\left(\frac{kl}{a}, s\right)\varphi^{(k)}(s) + 2\partial_t K_0\left(\frac{kl}{a}, s\right)\psi^{(k)}(s) + K_0\left(\frac{kl}{a}, s\right) \times \right. \\ \left. \times \left(a^2 d^2\varphi^{(k)}(s) + \varphi^{(k)}(s)\lambda\left(\frac{kl}{a}, s\right) \right) \right) ds = \sigma_2^{(k)}, \\ \frac{1}{a^2}d^2q^{(l)}\left(\frac{kl}{a}\right) - d^2\varphi^{(k)}(l) - \frac{1}{a^2}\varphi^{(k)}(l)\lambda\left(\frac{kl}{a}, l\right) + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{1}{a^2} \int_0^l \left(\partial_t^2 K_l \left(\frac{kl}{a}, s \right) \varphi^{(k)}(s) + 2 \partial_t K_l \left(\frac{kl}{a}, s \right) \psi^{(k)}(s) + K_l \left(\frac{kl}{a}, s \right) \times \right. \\
 & \left. \times \left(a^2 d^2 \varphi^{(k)}(s) + \varphi^{(k)}(s) \lambda \left(\frac{kl}{a}, s \right) \right) \right) ds = \delta_2^{(k)},
 \end{aligned} \tag{10}$$

где $\varphi^{(k)}(x) = u^{(k-1)}\left(\frac{kl}{a}, x\right)$, $\psi^{(k)}(x) = \partial_x u^{(k-1)}\left(\frac{kl}{a}, x\right)$, $\sigma_i^{(k)}, \delta_i^{(k)} \in \mathbb{R}$, $i = \overline{0, 2}$, $k = 1, 2, \dots$.

Л е м м а 1. Пусть в области $Q^{(k)}$ справедливы неоднородные условия согласования (10) и выполняются условия на гладкость функций $\lambda \in C^1(\overline{Q})$, $q^{(j)} \in C^2([0; +\infty))$, $K_j \in C^2(\overline{Q})$, $j \in \{0, l\}$, $\varphi^{(k)} \in C^2([0; l])$, $\psi^{(k)} \in C^1([0; l])$. Тогда для решения $u^{(k,j)}(t, x)$, $(t, x) \in Q^{(k,j)}$, задачи (4)–(6) справедливы следующие условия сопряжения:

$$\begin{aligned}
 & u^{(k,j+1)}(t, at - kl) - u^{(k,j)}(t, at - kl) = \sigma_0^{(k)}, \\
 & \partial_x u^{(k,j+1)}(t, at - kl) - \partial_x u^{(k,j)}(t, at - kl) = \sigma_1^{(k)} - \frac{\sigma_0^{(k)}}{4a^2} \int_{kl}^{-kl+2at} \lambda \left(\frac{\eta + kl}{2a}, \frac{\eta - kl}{2} \right) d\eta, \\
 & \partial_x^2 u^{(k,j+1)}(t, at - kl) - \partial_x^2 u^{(k,j)}(t, at - kl) = \sigma_2^{(k)} + \frac{\sigma_1^{(k)}}{4a^2} \int_{-kl+2at}^{kl} \lambda \left(\frac{\eta + kl}{2a}, \frac{\eta - kl}{2} \right) d\eta + \\
 & + \frac{\sigma_0^{(k)}}{2a^2} \left(\frac{1}{4} \int_{-kl+2at}^{kl} \left(\partial_x \lambda \left(\frac{\eta + kl}{2a}, \frac{\eta - kl}{2} \right) - \frac{1}{a} \partial_t \lambda \left(\frac{\eta + kl}{2a}, \frac{\eta - kl}{2} \right) - \right. \right. \\
 & \left. \left. - \frac{1}{2a^2} \int_{kl}^{2a\eta - kl} \lambda \left(\frac{\eta_1 + kl}{2a}, \frac{\eta_1 - kl}{2} \right) d\eta_1 \times \lambda \left(\frac{\eta + kl}{2a}, \frac{\eta - kl}{2} \right) \right) d\eta + \lambda \left(\frac{kl}{a}, 0 \right) - \lambda(t, -kl + at) \right), \\
 & j \in \{1, 3\}, t \in \left[\frac{kl}{a}, \frac{(k+1)l}{a} \right],
 \end{aligned} \tag{11}$$

$$\begin{aligned}
 & u^{(k,j+2)}(t, (k+1)l - at) - u^{(k,j)}(t, (k+1)l - at) = \delta_0^{(k)}, \\
 & \partial_x u^{(k,j+2)}(t, (k+1)l - at) - \partial_x u^{(k,j)}(t, (k+1)l - at) = \delta_1^{(k)} + \frac{\delta_0^{(k)}}{4a^2} \int_{(k+1)l-2at}^{-(k-1)l} \lambda \left(\frac{(k+1)l - \xi}{2a}, \frac{(k+1)l + \xi}{2} \right) d\xi, \\
 & \partial_x^2 u^{(k,j+2)}(t, (k+1)l - at) - \partial_x^2 u^{(k,j)}(t, (k+1)l - at) = \delta_2^{(k)} + \frac{\delta_1^{(k)}}{4a^2} \int_{(k+1)l-2at}^{-(k-1)l} \lambda \left(\frac{(k+1)l - \xi}{2a}, \frac{(k+1)l + \xi}{2} \right) d\xi + \\
 & + \frac{\delta_0^{(k)}}{2a^2} \left(\int_{(k+1)l-2at}^{-(k-1)l} \frac{1}{4} \left(\partial_x \lambda \left(\frac{(k+1)l - \xi}{2a}, \frac{(k+1)l + \xi}{2} \right) + \frac{1}{a} \partial_t \lambda \left(\frac{(k+1)l - \xi}{2a}, \frac{(k+1)l + \xi}{2} \right) + \right. \right. \\
 & \left. \left. + \frac{1}{2a^2} \lambda \left(\frac{(k+1)l - \xi}{2a}, \frac{(k+1)l + \xi}{2} \right) \int_{(k+1)l-2a\xi}^{-(k-1)l} \lambda \left(\frac{(k+1)l - \xi_1}{2a}, \frac{(k+1)l + \xi_1}{2} \right) d\xi_1 \right) d\xi + \right. \\
 & \left. + \lambda \left(\frac{kl}{a}, l \right) - \lambda(t, (k+1)l - at) \right), j \in \{1, 2\}, t \in \left[\frac{kl}{a}, \frac{(k+1)l}{a} \right],
 \end{aligned} \tag{12}$$

где константы $\delta_j^{(k)}, \sigma_j^{(k)}$, $j = \overline{0, 2}$, определяются по (10).

С л е д с т в и е 1. Какими бы ни были гладкими функции $q^{(j)}(t)$, $\varphi^{(k)}(x)$, $\psi^{(k)}(x)$, K_j , $j \in \{0, l\}$, в задаче (4)–(6) при выполнении неравенства $\sum_{j=0}^2 (\sigma_j^{(k)})^2 + (\delta_j^{(k)})^2 \neq 0$, не существует классического решения задачи (4)–(6), определенного на $Q^{(k)}$.

Рассмотрим следующую область: $\tilde{Q} = \{(t, x) \in Q \mid x + at \neq (k+1)l \wedge x - at \neq -kl, k = 0, 1, 2, \dots\}$.
Для дальнейших рассуждений понадобятся множества $\overline{Q^{(k)}} = \overline{Q^{(k)}} \cap \tilde{Q}$.

С л е д с т в и е 2. Пусть в области $Q^{(k)}$ функции $\lambda \in C^1(\overline{Q})$, $q^{(j)} \in C^2([0; +\infty))$, $K_j \in C^2(\overline{Q})$, $j \in \{0, 1\}$, $\varphi^{(k)} \in C^2([0; l])$, $\psi^{(k)} \in C^1([0; l])$ и $\sum_{j=0}^2 (\sigma_j^{(k)})^2 + (\delta_j^{(k)})^2 \neq 0$. Тогда функция $u^{(k)}(t, x)$ из класса $C^2(\overline{Q^{(k)}})$, определенная по (9), является единственным классическим решением задачи (4)–(6) на $\overline{Q^{(k)}}$ тогда и только тогда, когда выполнены условия согласования (10).

З а м е ч а н и е. Если $\sigma_0^{(k)} = \delta_0^{(k)} = 0$ и $\sum_{j=1}^2 (\sigma_j^{(k)})^2 + (\delta_j^{(k)})^2 \neq 0$, то функция $u^{(k)}(t, x)$ из класса $C(\overline{Q}) \cap C^2(\overline{Q^{(k)}})$, определенная по (9), является единственным классическим решением задачи (4)–(6) на $\overline{Q^{(k)}}$ тогда и только тогда, когда выполнены условия согласования (10).

Можно сформулировать аналогичные замечания для различных случаев, когда какие-либо из значений $\sigma_j^{(k)}$ и $\delta_j^{(k)}$ обращаются в нуль.

Далее показана зависимость скачков $\sigma_j^{(k)}, \delta_j^{(k)}$ от $\sigma_j^{(k-1)}, \delta_j^{(k-1)}$, $j = \overline{0, 2}$.

Л е м м а 2. Пусть в области $Q^{(k-1)}$ выполняются неоднородные условия согласования (10). Тогда справедливы следующие выражения, определяющие зависимость $\sigma_j^{(k)}$ от $\delta_j^{(k-1)}$, $j = \overline{0, 2}$:

$$\begin{aligned} \sigma_0^{(k)} &= -\delta_0^{(k-1)} \left(1 + \int_0^l K_l \left(\frac{(k-1)l}{a}, s \right) ds \right), \\ \sigma_1^{(k)} &= \delta_1^{(k-1)} \left(1 + \int_0^l K_l \left(\frac{(k-1)l}{a}, s \right) ds \right) + \frac{\delta_0^{(k-1)}}{4a^2} \int_{-kl}^{2l-kl} \lambda \left(\frac{kl-\xi}{2a}, \frac{kl+\xi}{2} \right) d\xi + \frac{\delta_0^{(k-1)}}{a} \int_0^l \partial_t K_l \left(\frac{(k-1)l}{a}, s \right) ds, \\ \sigma_2^{(k)} &= -\delta_2^{(k-1)} \left(1 + \int_0^l K_l \left(\frac{(k-1)l}{a}, s \right) ds \right) + \frac{1}{16a^4} \int_{2l-kl}^{-kl} \left(4a^2 \delta_1^{(k-1)} + \delta_0^{(k-1)} \int_{\xi}^{2l-kl} \lambda \left(\frac{kl-\tau}{2a}, \frac{kl+\tau}{2} \right) d\tau \right) \times \\ &\quad \times \lambda \left(\frac{kl-\xi}{2a}, \frac{kl+\xi}{2} \right) d\xi + \frac{\delta_0^{(k-1)}}{8a^2} \int_{2l-kl}^{-kl} \partial_x \lambda \left(\frac{kl-\xi}{2a}, \frac{kl+\xi}{2} \right) + \frac{1}{a} \partial_t \lambda \left(\frac{kl-\xi}{2a}, \frac{kl+\xi}{2} \right) d\xi + \\ &\quad + \frac{\delta_0^{(k-1)}}{2a^2} \left(\lambda \left(\frac{kl}{a}, 0 \right) + \lambda \left(\frac{(k-1)l}{a}, l \right) \right) - \frac{\delta_0^{(k-1)}}{2a^2} \lambda \left(\frac{kl}{a}, 0 \right) \int_0^l K_l \left(\frac{(k-1)l}{a}, s \right) ds - \\ &\quad - \frac{1}{a^2} \int_0^l \partial_t^2 K_l \left(\frac{kl}{a}, s \right) \delta_0^{(k-1)} + 2\partial_t K_l \left(\frac{(k-1)l}{a}, s \right) \delta_1^{(k-1)} + K_l \left(\frac{(k-1)l}{a}, s \right) \delta_0^{(k-1)} \lambda \left(\frac{(k-1)l}{a}, s \right) ds, \end{aligned}$$

а также зависимость $\delta_j^{(k)}$ от $\sigma_j^{(k-1)}$, $j = \overline{0, 2}$:

$$\begin{aligned} \delta_0^{(k)} &= -\sigma_0^{(k-1)} \left(1 + \int_0^l K_0 \left(\frac{(k-1)l}{a}, s \right) ds \right), \\ \delta_1^{(k)} &= -\sigma_1^{(k-1)} \left(1 + \int_0^l K_0 \left(\frac{(k-1)l}{a}, s \right) ds \right) + \frac{\sigma_0^{(k-1)}}{4a^2} \int_{(k+1)l}^{(k-1)l} \lambda \left(\frac{\eta+(k-1)l}{2a}, \frac{\eta-(k-1)l}{2} \right) d\eta - \\ &\quad - \frac{\sigma_0^{(k-1)}}{a} \int_0^l \partial_t K_0 \left(\frac{(k-1)l}{a}, s \right) ds, \\ \delta_2^{(k)} &= -\sigma_2^{(k-1)} \left(1 + \int_0^l K_0 \left(\frac{(k-1)l}{a}, s \right) ds \right) + \frac{\sigma_0^{(k-1)}}{2a^2} \left(\lambda \left(\frac{kl}{a}, l \right) + \lambda \left(\frac{(k-1)l}{a}, 0 \right) \right) + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{\sigma_0^{(k-1)}}{8a^2} \int_{(k+1)l}^{(k-1)l} \partial_x \lambda \left(\frac{\eta + (k-1)l}{2a}, \frac{\eta - (k-1)l}{2} \right) + \frac{1}{a} \partial_t \lambda \left(\frac{\eta + (k-1)l}{2a}, \frac{\eta - (k-1)l}{2} \right) d\eta + \\
 & + \frac{1}{16a^4} \int_{(k+1)l}^{(k-1)l} \lambda \left(\frac{\eta + (k-1)l}{2a}, \frac{\eta - (k-1)l}{2} \right) \left(-4a^2 \sigma_1^{(k-1)} + \sigma_0^{(k-1)} \int_{(k-1)l}^{\eta} \lambda \left(\frac{\tau + (k-1)l}{2a}, \frac{\tau - (k-1)l}{2} \right) d\tau \right) d\eta + \\
 & + \frac{1}{a^2} \int_0^l \partial_t^2 K_0 \left(\frac{(k-1)l}{a}, s \right) \sigma_0^{(k-1)} + 2\partial_t K_0 \left(\frac{(k-1)l}{a}, s \right) \sigma_1^{(k-1)} + K_0 \left(\frac{(k-1)l}{a}, s \right) \times \\
 & \times \left(\sigma_0^{(k-1)} \lambda \left(\frac{(k-1)l}{a}, s \right) \right) ds + \frac{\sigma_0^{(k-1)}}{2a^2} \lambda \left(\frac{(k-1)l}{a}, l \right) \int_0^l K_0 \left(\frac{(k-1)l}{a}, s \right) ds.
 \end{aligned}$$

С л е д с т в и е 3. Условия согласования (10) выполняются при некотором k , тогда и только тогда, когда они выполняются для $k - 1$.

С л е д с т в и е 4. Если для некоторого k выполняются однородные условия согласования, то для всех $t > k, t \in \mathbb{N}$, выполняются однородные условия согласования.

С л е д с т в и е 5. Если существуют такие номера $k_j^{(i)}, i \in \{0, l\}, j = \overline{1, 3}$, причем $k_{j_1}^{(i)} \neq k_{j_2}^{(i)}, j_1 \neq j_2$, что $\int_0^l K_i \left(\frac{(k_j^{(i)} - 1)l}{a}, s \right) ds = -1$, то $u(t, x) \in C^2 \left(\bigcup_{k=\max(k_j^{(i)})}^{\infty} \overline{Q^{(k)}} \right), i = 0, l$.

С л е д с т в и е 6. Если для некоторого k выполняются однородные условия согласования, то может существовать такой номер $n < k, n \in \mathbb{N}$, что для всех $0 \leq t \leq n, t \in \mathbb{N}$, выполняются неоднородные условия согласования (10).

Таким образом, из леммы 2 и следствий 3–6 получена следующая теорема.

Т е о р е м а 2. Пусть $\lambda \in C^1(\overline{Q}), q^{(j)} \in C^2([0; +\infty)), K_j \in C^2(\overline{Q}), j \in \{0, l\}, \varphi \in C^2([0; l]), \psi \in C^1([0; l])$. Решение задачи (4)–(6), определяемое (9) и удовлетворяющее условиям сопряжения (11), (12), является единственным классическим в области \tilde{Q} тогда и только тогда, когда выполнены неоднородные условия согласования

$$\begin{aligned}
 & q^{(0)}(0) - \varphi(0) + \int_0^l K_0(0, s)\varphi(s)ds = \sigma_0^{(0)}, q^{(l)}(0) - \varphi(l) + \int_0^l K_l(0, s)\varphi(s)ds = \delta_0^{(0)}, \\
 & -\frac{1}{a}dq^{(0)}(0) + \frac{1}{a}\psi(0) - \frac{1}{a} \int_0^l (\partial_t K_0(0, s)\varphi(s) + \psi(s)K_0(0, s))ds = \sigma_1^{(0)}, \\
 & \frac{1}{a}dq^{(l)}(0) - \frac{1}{a}\psi(l) - \frac{1}{a} \int_0^l (\partial_t K_l(0, s)\varphi(s) + \psi(s)K_l(0, s))ds = \delta_1^{(0)}, \\
 & \frac{1}{a^2}d^2q^{(0)}(0) - d^2\varphi(0) - \frac{1}{a^2}\varphi(0)\lambda(0, 0) + \\
 & + \frac{1}{a^2} \int_0^l (\partial_t^2 K_0(0, s)\varphi(s) + 2\partial_t K_0(0, s)\psi(s) + K_0(0, s)(a^2d^2\varphi(s) + \varphi(s)\lambda(0, s)))ds = \sigma_2^{(0)}, \\
 & \frac{1}{a^2}d^2q^{(l)}(0) - d^2\varphi(l) - \frac{1}{a^2}\varphi(l)\lambda(0, l) + \\
 & + \frac{1}{a^2} \int_0^l (\partial_t^2 K_l(0, s)\varphi(s) + 2\partial_t K_l(0, s)\psi(s) + K_l(0, s)(a^2d^2\varphi(s) + \varphi(s)\lambda(0, s)))ds = \delta_2^{(0)}.
 \end{aligned}$$

Неоднородное уравнение с неоднородными условиями согласования. Рассмотрим теперь неоднородное уравнение (1). В силу линейности, решение $v(t, x)$ данного уравнения можно представить как сумму решения $u(t, x)$ однородного уравнения и некоторого частного решения

$w(t, x)$ неоднородного уравнения, т. е. $v(t, x) = u(t, x) + w(t, x)$. В качестве задачи для поиска некоторого частного решения $w(t, x)$ рассмотрим задачу (7), (8).

Как было показано в [5], решение $w(t, x)$ задачи (7), (8) существует в классе $C^2(\bar{Q})$ при выполнении условий $\lambda, f \in C^1(\bar{Q})$. Таким образом, для задачи (1)–(3) справедлива следующая теорема.

Т е о р е м а 3. Пусть $\lambda, f \in C^1(\bar{Q})$, $q^{(j)} \in C^2([0; +\infty))$, $K_j \in C^2(\bar{Q})$, $j \in \{0, l\}$, $\varphi \in C^2([0; l])$, $\psi \in C^1([0; l])$. Решение задачи (1)–(3), удовлетворяющее условиям сопряжения (11), (12), является единственным классическим в области \tilde{Q} тогда и только тогда, когда выполнены неоднородные условия согласования

$$\begin{aligned} \widetilde{q^{(0)}}(0) - \varphi(0) + \int_0^l K_0(0, s)\varphi(s)ds &= \sigma_0^{(0)}, \quad \widetilde{q^{(l)}}(0) - \varphi(l) + \int_0^l K_l(0, s)\varphi(s)ds = \delta_0^{(0)}, \\ -\frac{1}{a}d\widetilde{q^{(0)}}(0) + \frac{1}{a}\psi(0) - \frac{1}{a}\int_0^l (\partial_t K_0(0, s)\varphi(s) + \psi(s)K_0(0, s))ds &= \sigma_1^{(0)}, \\ \frac{1}{a}d\widetilde{q^{(l)}}(0) - \frac{1}{a}\psi(l) - \frac{1}{a}\int_0^l (\partial_t K_l(0, s)\varphi(s) + \psi(s)K_l(0, s))ds &= \delta_1^{(0)}, \\ \frac{1}{a^2}d^2\widetilde{q^{(0)}}(0) - d^2\varphi(0) - \frac{1}{a^2}(\varphi(0)\lambda(0, 0) + f(0, 0)) + \\ + \frac{1}{a^2}\int_0^l (\partial_t^2 K_0(0, s)\varphi(s) + 2\partial_t K_0(0, s)\psi(s) + K_0(0, s)(a^2 d^2\varphi(s) + \varphi(s)\lambda(0, s) + f(0, s)))ds &= \sigma_2^{(0)}, \\ \frac{1}{a^2}d^2\widetilde{q^{(l)}}(0) - d^2\varphi(l) - \frac{1}{a^2}(\varphi(l)\lambda(0, l) + f(0, l)) + \\ + \frac{1}{a^2}\int_0^l (\partial_t^2 K_l(0, s)\varphi(s) + 2\partial_t K_l(0, s)\psi(s) + K_l(0, s)(a^2 d^2\varphi(s) + \varphi(s)\lambda(0, s) + f(0, s)))ds &= \delta_2^{(0)}. \end{aligned}$$

Заключение. В данном сообщении рассмотрена смешанная задача для уравнения типа Клейна–Гордона–Фока с интегральными условиями в случае, когда выполняются неоднородные условия согласования. Поставлена эквивалентная задача сопряжения, результаты которой можно применять при численном моделировании.

Отдельно стоит отметить, что в отличие от первой смешанной задачи [7], в которой разрывы $\delta_i^{(k)}$, $\sigma_i^{(k)}$, $i = 0, 2$, $k = 0, 1, \dots$, сохраняются, в задаче с интегральными условиями разрывы на характеристиках могут быть сглажены, начиная с некоторой области $Q^{(k)}$, при выполнении условий следствия 5.

Список использованных источников

1. Корзюк, В. И. Первая смешанная задача для уравнения Клейна–Гордона–Фока в полуполосе / В. И. Корзюк, И. И. Столярчук // Дифференц. уравнения. – 2014. – Т. 50, № 8. – С. 1105–1117. <https://doi.org/10.1134/s0374064114080081>
2. Корзюк, В. И. Классическое решение первой смешанной задачи для уравнения Клейна–Гордона–Фока в криволинейной полуполосе / В. И. Корзюк, И. И. Столярчук // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2014. – Т. 58, № 3. – С. 9–15.
3. Корзюк, В. И. Классическое решение первой смешанной задачи для гиперболического уравнения второго порядка в криволинейной полуполосе с переменными коэффициентами / В. И. Корзюк, И. И. Столярчук // Дифференц. уравнения. – 2017. – Т. 53, № 1. – С. 77–88. <https://doi.org/10.1134/s0374064117010071>
4. Корзюк, В. И. Классическое решение смешанной задачи для уравнения Клейна–Гордона–Фока с нелокальными условиями / В. И. Корзюк, И. И. Столярчук // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2017. – Т. 61, № 6. – С. 20–27.
5. Корзюк, В. И. Классическое решение смешанной задачи для уравнения Клейна–Гордона–Фока с нелокальными условиями / В. И. Корзюк, И. И. Столярчук // Тр. Ин-та математики. – 2018. – Т. 26, № 1. – С. 54–70.
6. Корзюк, В. И. Классические решения задач для гиперболических уравнений: Курс лекций в 10 ч. / В. И. Корзюк, И. С. Козловская. – Минск, 2017. – Ч. 2. – 52 с.
7. Корзюк, В. И. Классическое решение первой смешанной задачи для уравнения типа Клейна–Гордона–Фока с неоднородными условиями согласования / В. И. Корзюк, И. И. Столярчук // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2019. – Т. 63, № 1. – С. 7–13. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-1-7-13>

References

1. Korzyuk V. I., Stolyarchuk I. I. Classical solution of the first mixed problem for the Klein–Gordon–Fock equation in a half-strip. *Differential Equations*, 2014, vol. 50, no. 8, pp. 1098–1111. <https://doi.org/10.1134/s0012266114080084>
2. Korzyuk V. I., Stolyarchuk I. I. Classical solution to the first mixed problem for Klein–Gordon–Fock equation in the curvilinear half-strip. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2014, vol. 58, no. 3, pp. 9–15 (in Russian).
3. Korzyuk V. I., Stolyarchuk I. I. Classical solution of the first mixed problem for second-order hyperbolic equation in curvilinear half-strip with variable coefficients. *Differential Equations*, 2017, vol. 53, no. 1, pp. 74–85. <https://doi.org/10.1134/s0012266117010074>
4. Korzyuk V. I., Stolyarchuk I. I. Classical solution to the mixed problem for the Klein–Gordon–Fock equation with the unlocal conditions. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2017, vol. 61, no. 6, pp. 20–27 (in Russian).
5. Korzyuk V. I., Stolyarchuk I. I. Classical solution to the mixed problem for the Klein–Gordon–Fock equation with the unlocal conditions. *Trudy Instituta matematiki = Proceedings of the Institute of Mathematics*, 2018, vol. 26, no. 1, pp. 54–70 (in Russian).
6. Korzyuk V. I., Kozlovskaya I. S. *Classical problem solutions for hyperbolic equations: A course of lectures in 10 parts*. Minsk, 2017, part 2. 52 p. (in Russian).
7. Korzyuk V. I., Stolyarchuk I. I. Classical solution of the first mixed problem for the Klein–Gordon–Fock equation with inhomogeneous matching conditions. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2019, vol. 63, no. 1, pp. 7–13 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-1-7-13>

Информация об авторах

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

Столярчук Иван Игоревич – магистр физ.-мат. наук, аспирант. Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: ivan.telkontar@gmail.com.

Information about the authors

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

Stolyarchuk Ivan Igorevich – Master of Physics and Mathematics, Postgraduate student. Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ivan.telkontar@gmail.com.

ISSN 1561-8323 (Print)

ISSN 2524-2431 (Online)

УДК 517.925

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-2-150-156>

Поступило в редакцию 13.03.2019

Received 13.03.2019

Биньбинь Чжан, Ян Чэнь, И. П. Мартынов*Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь***О РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕШЕНИЯХ ДВУХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ
С ПОДВИЖНОЙ ОСОБОЙ ЛИНИЕЙ***(Представлено академиком Н. А. Изобовым)*

Аннотация. Работа посвящена аналитической теории обыкновенных дифференциальных уравнений. Объектом исследования являются нелинейные автономные дифференциальные уравнения третьего порядка с подвижной особой линией. Известны двухпараметрические рациональные решения этих уравнений. Цель исследования – выяснить вопрос, как из общих решений уравнений с подвижной особой линией получить двухпараметрические рациональные решения. В аналитической теории дифференциальных уравнений, как правило, нелинейные дифференциальные уравнения имеют отрицательные резонансы. Среди этих резонансов обязательно содержится резонанс, равный -1 (тривиальный случай). При этом в работах некоторых авторов утверждается, что природа нетривиальных отрицательных резонансов до настоящего времени не понята. Представляют интерес уравнения, решения которых имеют только нетривиальные отрицательные резонансы. Оказывается, что по отрицательным резонансам можно строить рациональные решения рассматриваемых уравнений. В данной работе указано необходимое и достаточное условие, при котором двухпараметрическое рациональное решение уравнения с подвижной особой линией можно получить из его общего решения.

Ключевые слова: дифференциальное уравнение, подвижная особая линия, общее решение, рациональное решение, ряд Лорана, абсолютная сходимости, резонансы

Для цитирования. Биньбинь Чжан, Ян Чэнь, И. П. Мартынов // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2019. – Т. 63, № 2. – С. 150–156. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-2-150-156>

Bin-Bin Zhang, Yang Chen, Ivan P. Martynov*Yanka Kupala State University of Grodno, Grodno, Republic of Belarus***ON RATIONAL SOLUTIONS OF TWO DIFFERENTIAL EQUATIONS WITH A MOVING SINGULAR LINE***(Communicated by Academician Nilolai A. Izobov)*

Abstract. The study is devoted to the analytical theory of ordinary differential equations. In the introduction, it is said that the object of investigation is nonlinear third-order autonomous differential equations with a moving singular line, and whose two-parameter rational solutions are known. The study aims to clarify how to obtain two-parameter rational solutions from the general solutions of these equations. In the analytical theory of differential equations, as a rule, nonlinear differential equations have negative resonances. Among these resonances is the resonance equal to -1 (trivial case). However, it is asserted in some of the researchers' papers that the nature of these negative resonances has not been found until now. The equations only with non-trivial negative resonance arose the interest of researchers. And it appears that the rational solutions of the equations can be constructed by their negative resonances. In this paper, a necessary and sufficient condition is indicated, at which the two-parameter rational solution of the equation with a moving singular line can be obtained from its general solution.

Keywords: differential equation, moving singular line, general solution, rational solution, Laurent series, absolute convergence, resonances

For citation: Bin-Bin Zhang, Yang Chen, Martynov I. P. On rational solutions of two differential equations with a moving singular line. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2019, vol. 63, no. 2, pp. 150–156 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-2-150-156>

Введение. Если автономное дифференциальное уравнение

$$P(y^{(n)}, \dots, y', y) = 0,$$

где P – полином по $y^{(n)}, \dots, y$, имеет решение, представимое рядом Лорана

$$y = h_0(z - z_0)^{-s} + \dots + h(z - z_0)^{r-s} + \dots, s \in \mathbb{Z}, \quad (1)$$

то решению (1) будем сопоставлять набор

$$(s, h_0; r_1, r_2, \dots, r_n). \quad (2)$$

Числа r_1, r_2, \dots, r_n называют резонансами [1]. Для однозначности решения (1) в области его определения согласно [1–4] необходимо, чтобы резонансы $r_k, k = 1, 2, \dots, n$, были целыми и различными, причем один из них равен -1 [2].

Следуя [4], отрицательные резонансы, отличные от -1 , будем называть нетривиальными. Представляют интерес уравнения, решениям которых отвечают наборы вида (2) с нетривиальными отрицательными резонансами [4–7].

Рассмотрим два дифференциальных уравнения с подвижной особой линией из [8] и [9] соответственно

$$y''' = 12yy'' - 18(y')^2, \quad (3)$$

$$x''' = \frac{(x'' - 2xx')^2}{x' - x^2} + 4xx'' - 2(x')^2. \quad (4)$$

Решению уравнения (3) отвечает набор вида (2) $(1, -1; -1, -2, -3)$.

В [8] приведено двухпараметрическое рациональное решение уравнения (3)

$$y = -\frac{1}{z - z_1} - \frac{b}{(z - z_1)^2}, \quad \forall z_1, b \in \mathbb{C}. \quad (5)$$

Легко проверить, что (4) также имеет двухпараметрическое рациональное решение

$$x = -\frac{1}{z - z_1} - \frac{a}{(z - z_1)^2}, \quad \forall z_1, a \in \mathbb{C}. \quad (6)$$

В [10] получено преобразование Бэклунда между уравнениями (3) и (4)

$$6y = \frac{x'' - 2x^3}{x' - x^2}, \quad x^3 - 3x^2y + 3xy' - \frac{1}{2}y'' = 0. \quad (7)$$

Формулы (7) показывают, что между рациональными решениями (5) и (6) уравнений (3) и (4) имеет место соответствие, если

$$a = 3b. \quad (8)$$

Общие решения уравнений (3) и (4) в проколотой окрестности бесконечно удаленной точки $V(\infty)$ можно представить рядами Лорана так:

$$y = -\frac{1}{z - z_0} - \sum_{k=0}^{\infty} \frac{b_k}{(z - z_0)^{k+2}}, \quad \forall b_0, b_1, b_2 \in \mathbb{C}, \quad (9)$$

$$x = -\frac{1}{z - z_0} - \sum_{k=0}^{\infty} \frac{a_k}{(z - z_0)^{k+2}}, \quad \forall a_0, a_1, a_2 \in \mathbb{C}. \quad (10)$$

В данной работе решим задачу: найти условия, при которых из общих решений (9) и (10) дифференциальных уравнений (3) и (4), имеющих *подвижную особую линию*, получаются двухпараметрические рациональные решения (5) и (6) соответственно.

Основные результаты. Подставляя ряд (9) в (3), для коэффициентов b_k получим рекуррентную формулу

$$b_{k+1} = \frac{6}{k(k^2-1)} \sum_{m=0}^k (m+2)(5m-3k)b_m b_{k-m}, \quad k = 2, 3, \dots, \quad (11)$$

где b_0, b_1, b_2 – произвольные комплексные постоянные.

Пусть $|b_0| \leq \frac{p}{q}$, $|b_1| \leq \frac{p^2}{q}$, $p, q \in \mathbb{R}$, $p > 0$, $q > 0$.

Л е м м а 1. *Существуют такие положительные действительные числа p и q , что если $|b_m| \leq \frac{p^{m+1}}{q}$, $0 \leq m \leq k$, то $|b_{k+1}| \leq \frac{p^{k+2}}{q}$.*

В самом деле, из (11) получим

$$\begin{aligned} |b_{k+1}| &\leq \frac{6}{k(k^2-1)} \sum_{m=0}^k (m+2)(5m+3k)|b_m b_{k-m}| \leq \\ &\leq \frac{6p^{k+2}}{k(k^2-1)q^2} \sum_{m=0}^k (m+2)(5m+3k) = \frac{p^{k+2}}{q} \frac{19k+71}{(k-1)q} \leq \frac{p^{k+2}}{q}, \end{aligned}$$

если $\frac{19k+71}{(k-1)q} \leq 1$, т. е. $(q-19)k \geq q+71$, $k = 2, 3, \dots$.

Можно взять $q \geq 120$, тогда это неравенство выполнено.

Вывод: существуют положительные действительные числа p, q такие, что

$$|b_n| \leq \frac{p^{n+1}}{q} \quad \text{для } \forall n \in \mathbb{N} \cup \{0\}. \quad (12)$$

С л е д с т в и е. *Ряд (9) сходится абсолютно, если $\frac{p}{|z-z_0|} < 1$, т. е. если $|z-z_0| > p$, $p > 0$.*

В самом деле, ряд

$$w = -\frac{1}{z-z_0} - \frac{1}{pq} \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{p}{z-z_0} \right)^{k+2}$$

с учетом условия (12) будет мажорантным для (9).

Пусть в разложении (9) будет

$$b_1 = (1-\delta^2)b_0^2, \quad b_2 = (1-\delta)^2(2\delta+1)b_0^3, \quad \delta \in \mathbb{C}.$$

Л е м м а 2. *Если в разложении (9) будет*

$$b_m = (1-\delta)^m (m\delta+1)b_0^{m+1}, \quad 0 \leq m \leq k,$$

то

$$b_{k+1} = (1-\delta)^{k+1} ((k+1)\delta+1)b_0^{k+2}.$$

Д о к а з а т е л ь с т в о. Из (11) будем иметь

$$\begin{aligned} b_{k+1} &= \frac{6}{k(k^2-1)} \sum_{m=0}^k (m+2)(5m-3k)(1-\delta)^k b_0^{k+2} (m\delta+1)((k-m)\delta+1) = \\ &= \frac{6(1-\delta)^k b_0^{k+2}}{k(k^2-1)} \sum_{m=0}^k (m(k-m)(5m^2 + (10-3k)m - 6k)\delta^2 + (k\delta+1)(5m^2 + (10-3k)m - 6k)) = \\ &= \frac{(1-\delta)^k b_0^{k+2}}{k-1} ((1-k^2)\delta^2 + (k-1)\delta+1) = (1-\delta)^{k+1} ((k+1)\delta+1)b_0^{k+2}. \end{aligned}$$

Вывод: согласно методу математической индукции заключаем, что

$$b_n = (1 - \delta)^n (n\delta + 1)b_0^{n+1}, \quad \forall n \in \mathbb{N} \cup \{0\}. \quad (13)$$

Имеет место

Т е о р е м а 1. *Чтобы получить рациональное решение (5) из общего решения (9) уравнения (3), необходимо и достаточно коэффициенты b_0, b_1, b_2 подчинить условию*

$$(b_2 - 3b_0b_1 + 2b_0^3)^2 = 4(b_0^2 - b_1)^3. \quad (14)$$

Д о к а з а т е л ь с т в о. Пусть $b_0 \neq 0$. Коэффициенты b_0 и b_1 свяжем условием

$$b_1 = (1 - \delta^2)b_0^2, \quad \delta \in \mathbb{C}.$$

Тогда из (14) получим $b_2 = (1 - \delta)^2(2\delta + 1)b_0^3$. В этом случае по лемме 2 будем иметь (13).

Положим $b_0 = b + c$, $\delta = \frac{b}{b+c}$. Тогда из (13) найдем

$$b_k = (k+1)bc^k + c^{k+1}, \quad \forall k \in \mathbb{N} \cup \{0\}. \quad (15)$$

Подставляя (15) в разложении (9) и считая $|z - z_0| > |c|$, получим

$$\begin{aligned} y &= -\frac{1}{z-z_0} - \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(k+1)bc^k + c^{k+1}}{(z-z_0)^{k+2}} = -\frac{1}{z-z_0} - \frac{c}{(z-z_0)^2} \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{c}{z-z_0}\right)^k + b \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{c^k}{(z-z_0)^{k+1}}\right)' = \\ &= -\frac{1}{z-z_0} - \frac{c}{(z-z_0)^2} \frac{1}{1-\frac{c}{z-z_0}} + b \left(\sum_{k=0}^{\infty} \frac{c^k}{(z-z_0)^{k+1}}\right)' = \\ &= -\frac{1}{z-z_0} - \frac{c}{(z-z_0)(z-z_0-c)} + b \left(\frac{1}{z-z_0} \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{c}{z-z_0}\right)^k\right)' = -\frac{1}{z-z_0-c} + b \left(\frac{1}{z-z_0} \frac{1}{1-\frac{c}{z-z_0}}\right)' = \\ &= -\frac{1}{z-z_0-c} + \left(\frac{b}{z-z_0-c}\right)' = -\frac{1}{z-z_0-c} - \frac{b}{(z-z_0-c)^2} = -\frac{1}{z-z_1} - \frac{b}{(z-z_1)^2}, \end{aligned}$$

где $z_1 = z_0 + c$.

Если $b_0 = 0$, то полагая $b_1 = -c^2$, из (14) получим $b_2 = -2c^3$. Используя (11), найдем $b_k = -kc^{k+1}$. Тогда

$$\begin{aligned} y &= -\frac{1}{z-z_0} + \sum_{k=0}^{\infty} \frac{kc^{k+1}}{(z-z_0)^{k+2}} = -\frac{1}{z-z_0} + \frac{c}{z-z_0} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{kc^k}{(z-z_0)^{k+1}} = \\ &= -\frac{1}{z-z_0} - \frac{c}{z-z_0} \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{c^k}{(z-z_0)^k}\right)' = -\frac{1}{z-z_0} - \frac{c}{z-z_0} \left(\sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{c}{z-z_0}\right)^k\right)' = \\ &= -\frac{1}{z-z_0} - \frac{c}{z-z_0} \left(\frac{1}{1-\frac{c}{z-z_0}}\right)' = -\frac{1}{z-z_0} - \frac{c}{z-z_0} \left(\frac{z-z_0}{z-z_0-c}\right)' = \\ &= -\frac{1}{z-z_0} + \frac{c^2}{(z-z_0)(z-z_0-c)^2} = -\frac{(z-z_0-c)-c}{(z-z_0-c)^2} = -\frac{1}{z-z_0-c} + \frac{c}{(z-z_0-c)^2}, \end{aligned}$$

т. е.

$$y = -\frac{1}{z-c_1} + \frac{c}{(z-z_1)^2}, \quad c = -b, \quad z_1 = z_0 + c.$$

С другой стороны, полагая $z_1 = z_0 + c$, из (5) получим

$$\begin{aligned} y &= -\frac{1}{z-z_0-c} - \frac{b}{(z-z_0-c)^2} = -\frac{1}{(z-z_0)\left(1-\frac{c}{z-z_0}\right)} - \frac{b}{(z-z_0)^2\left(1-\frac{c}{z-z_0}\right)^2} = \\ &= -\frac{1}{z-z_0} \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{c}{z-z_0}\right)^k - \frac{b}{(z-z_0)^2} \left(\sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{c}{z-z_0}\right)^k\right)^2 = \\ &= -\frac{1}{z-z_0} - \sum_{k=1}^{\infty} \frac{c^k}{(z-z_0)^{k+1}} - \frac{b}{(z-z_0)^2} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(k+1)c^k}{(z-z_0)^k} = \\ &= -\frac{1}{z-z_0} - \sum_{k=0}^{\infty} \frac{c^{k+1} + (k+1)bc^k}{(z-z_0)^{k+2}} = -\frac{1}{z-z_0} - \sum_{k=0}^{\infty} \frac{b_k}{(z-z_0)^{k+2}}, \\ & \quad b_k = (k+1)bc^k + c^{k+1}, \quad \forall k \in \mathbb{N} \cup \{0\}. \end{aligned}$$

Значит, $b_0 = b + c$, $b_1 = 2bc + c^2$, $b_2 = 3bc^2 + c^3$. Исключая b и c из этих соотношений, получим (14).

Теорема 1 доказана.

Л е м м а 3. Решения y и x уравнений (3) и (4) связаны соотношением

$$x' + 3y' = 6xy - 2x^2. \quad (16)$$

Д о к а з а т е л ь с т в о. Используя первое соотношение из (7), с учетом (4) найдем

$$\begin{aligned} 6y' &= \left(\frac{x'' - 2xx'}{x' - x^2} + 2x\right)' = 2x' + \frac{2xx'' - 4(x')^2}{x' - x^2} = \\ &= 2x' + 2x \frac{x'' - 2x^3}{x' - x^2} - 4(x' + x^2) = -2x' + 12xy - 4x^2, \end{aligned}$$

откуда следует (16).

Подставляя (9) и (10) в равенство (16), получим связь между коэффициентами a_k и b_k :

$$a_{k+1} + 3b_{k+1} = \frac{2}{k+1} \sum_{m=0}^k (3b_m - a_m) a_{k-m}, \quad (17)$$

$k = 0, 1, 2, \dots$, причем $\forall a_0, b_0$.

Пусть $a_0 = a + c$. Учитывая (8) и (15), из (17) получим $a_1 = 6bc + c^2$.

Л е м м а 4. Если в (10) считать

$$a_m = 3(m+1)bc^m + c^{m+1}, \quad m = \overline{0, k},$$

то

$$a_{k+1} = 3(k+2)bc^{k+1} + c^{k+2}.$$

Д о к а з а т е л ь с т в о. Так как

$$3b_m - a_m = 3((m+1)bc^m + c^{m+1}) - (3(m+1)bc^m + c^{m+1}) = 2c^{m+1},$$

то

$$\begin{aligned} a_{k+1} &= -3b_{k+1} + \frac{4}{k+1} \sum_{m=0}^k (3(k-m+1)bc^{k+1} + c^{k+2}) = \\ &= -3(k+2)bc^{k+1} - 3c^{k+2} + \frac{12bc^{k+1}}{k+1} \sum_{m=0}^k (k-m+1) + 4c^{k+2} = \\ &= c^{k+2} - 3(k+2)bc^{k+1} + 12bc^{k+1} \frac{k+2}{2} = 3(k+2)bc^{k+1} + c^{k+2} = (k+2)ac^{k+1} + c^{k+2}. \end{aligned}$$

Вывод: согласно методу математической индукции заключаем, что

$$a_n = (n+1)ac^n + c^{n+1}, \quad \forall n \in \mathbb{N} \cup \{0\}. \quad (18)$$

Теорема 2. Чтобы получить рациональное решение (6) уравнения (4) из общего решения (10), необходимо и достаточно коэффициенты a_0, a_1, a_2 подчинить условию

$$(a_2 - 3a_0a_1 + 2a_0^3)^2 = 4(a_0^2 - a_1)^3. \quad (19)$$

Доказательство теоремы 2 аналогично доказательству теоремы 1, если учесть вид формул (15) и (18), а также (14) и (19).

Замечание. При доказательстве лемм 2 и 4 были использованы формулы

$$\begin{aligned} \sum_{m=1}^k m &= \frac{k(k+1)}{2}, \quad \sum_{m=1}^k m^2 = \frac{1}{6}k(k+1)(2k+1), \\ \sum_{m=1}^k m^3 &= \frac{1}{4}k^2(k+1)^2, \quad \sum_{m=1}^k m^4 = \frac{1}{30}k(k+1)(2k+1)(3k^2+3k-1). \end{aligned}$$

Заключение. В работе для дифференциальных уравнений с подвижной особой линией (3) и (4) найдены необходимые и достаточные условия, при которых из общих решений, представленных абсолютно сходящимися в проколотой окрестности бесконечно удаленной точки рядами (9) и (10), получены рациональные решения соответственно (5) и (6). Эти условия даны теоремами 1 и 2.

Список использованных источников

1. Ablowitz, M. J. A connection between nonlinear evolution equations and ordinary differential equation of P-type. I / M. J. Ablowitz, A. Ramani, H. Segur // J. Math. Phys. – 1980. – Vol. 21, N 4. – P. 715–721. <https://doi.org/10.1063/1.524491>
2. Мартынов, И. П. О дифференциальных уравнениях с подвижными критическими особыми точками / И. П. Мартынов // Дифференц. уравнения. – 1973. – Т. 9, № 10. – С. 1780–1791.
3. Андреева, Т. К. О нулевых резонансах обыкновенных дифференциальных уравнений / Т. К. Андреева, И. П. Мартынов, В. А. Пронько // Весн. Гродзенскага дзярж. ун-та імя Янкі Купалы. Сер. 2. Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2010. – Т. 102, № 3. – С. 29–36.
4. Соболевский, С. Л. Существование рациональных решений дифференциальных уравнений со свойством Пенлеве и отрицательными резонансными числами / С. Л. Соболевский // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2012. – Т. 56, № 3. – С. 5–9.
5. Clarkson, P. A. Symmetry and Chazy equation / P. A. Clarkson, P. J. Olver // Journal of Differential Equation. – 1996. – Vol. 124, N 1. – P. 225–246. <https://doi.org/10.1006/jdeq.1996.0008>
6. Здунок, А. Г. О рациональных решениях дифференциальных уравнений / А. Г. Здунок, И. П. Мартынов, В. А. Пронько // Весн. Гродзенскага дзярж. ун-та імя Янкі Купалы. Сер. 2. Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2000. – Т. 3, № 1. – С. 33–39.
7. Jrad, F. Non-polynomial fourth order equations which pass the Painleve test / F. Jrad, U. Muğan // Zeitschrift für Naturforschung A. – 2005. – Vol. 60a, N 6. – P. 387–400. <https://doi.org/10.1515/zna-2005-0601>
8. Chazy, J. Sur les équations différentielles du troisième ordre et d'ordre supérieur dont l'intégrale générale a ses points critiques fixes / J. Chazy // Acta Math. – 1911. – Vol. 4. – P. 317–385. <https://doi.org/10.1007/bf02393131>
9. Мартынов, И. П. Аналитические свойства решений одного дифференциального уравнения третьего порядка / И. П. Мартынов // Дифференц. уравнения. – 1985. – Т. 21, № 5. – С. 764–771.
10. Чэнь Ян. Аналитические свойства системы Дарбу третьего порядка / Ян Чэнь // Весн. Гродзенскага дзярж. ун-та імя Янкі Купалы. Сер. 2. Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2018. – Т. 8, № 2. – С. 26–31.

References

1. Ablowitz M. J., Ramani A., Segur H. A connection between nonlinear evolution equations and ordinary differential equation of P-type. I. *Journal of Mathematical Physics*, 1980, vol. 21, no. 4, pp. 715–721. <https://doi.org/10.1063/1.524491>
2. Martynov I. P. On differential equations with movable critical singular points. *Differentsial'nye uravneniya = Differential equations*, 1973, vol. 9, no. 10, pp. 1780–1791 (in Russian).
3. Andreeva T. K., Martynov I. P., Pronko V. A. On the zero resonances of ordinary differential equations. *Vesnik Grodzenskaga dzyarzhaynaga yunivertsiteta imya Yanki Kupaly. Seryya 2. Matematyka. Fizika. Infarmatyka, vylichal'naya tekhnika i kiravanne = Vesnik of Yanka Kupala State University of Grodno. Series 2. Mathematics, Physics, Informatics, Computer Technology and its Control*, 2010, vol. 102, no. 3, pp. 29–36 (in Russian).
4. Sobolevsky S. L. Existence of rational solutions of differential equations with the Painlevé properties and negative resonance numbers. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2012, vol. 56, no. 3, pp. 5–9 (in Russian).
5. Clarkson P. A., Olver P. J. Symmetry and Chazy equation. *Journal of Differential Equation*, 1996, vol. 124, no. 1, pp. 225–246. <https://doi.org/10.1006/jdeq.1996.0008>
6. Zdunek A. G., Martynov I. P., Pronko V. A. On rational solutions of differential equations. *Vesnik Grodzenskaga dzyarzhaynaga yunivertsiteta imya Yanki Kupaly. Seryya 2. Matematyka. Fizika. Infarmatyka, vylichal'naya tekhnika i kiravanne = Vesnik of Yanka Kupala State University of Grodno. Series 2. Mathematics, Physics, Informatics, Computer Technology and its Control*, 2000, vol. 3, no. 1, pp. 33–39 (in Russian).
7. Jrad F., Mugan U. Non-polynomial fourth order equations which pass the Painleve test. *Zeitschrift für Naturforschung A.*, 2005, vol. 60a, no. 6, pp. 387–400. <https://doi.org/10.1515/zna-2005-0601>
8. Chazy J. Sur les équations différentielles du troisième ordre et d'ordre supérieur dont l'intégrale générale a ses points critiques fixes. *Acta Math.*, 1911, vol. 34, pp. 317–385 (in French). <https://doi.org/10.1007/bf02393131>
9. Martynov I. P. Analytic properties of solutions of a third order differential equation. *Differentsial'nye uravneniya = Differential equations*, 1985, vol. 21, no. 5, pp. 764–771 (in Russian).
10. Chen Y. Analytical properties of solutions of the third order Darboux system of the third order. *Vesnik Grodzenskaga dzyarzhaynaga yunivertsiteta imya Yanki Kupaly. Seryya 2. Matematyka. Fizika. Infarmatyka, vylichal'naya tekhnika i kiravanne = Vesnik of Yanka Kupala State University of Grodno. Series 2. Mathematics, Physics, Informatics, Computer Technology and its Control*, 2018, vol. 8, no. 2, pp. 26–31 (in Russian).

Информация об авторах

Чжан Биньбинь – аспирант. Гродненский государственный университет им. Янки Купалы (ул. Ожешко, 22, 230020, Гродно, Республика Беларусь). E-mail: binbinzhanghkj@163.com.

Чэнь Ян – аспирант. Гродненский государственный университет им. Янки Купалы (ул. Ожешко, 22, 230020, Гродно, Республика Беларусь). E-mail: 578211973@g.g.com.

Мартынов Иван Платонович – д-р физ.-мат. наук, профессор. Гродненский государственный университет им. Янки Купалы (ул. Ожешко, 22, 230020, Гродно, Республика Беларусь). E-mail: i.martynov@grsu.by.

Information about the authors

Zhang Bin-bin – Postgraduate student. Yanka Kupala State University of Grodno (22, Ozheshko Str., 230020, Grodno, Republic of Belarus). E-mail: binbinzhanghkj@163.com.

Chen Yang – Postgraduate student. Yanka Kupala State University of Grodno (22, Ozheshko Str., 230020, Grodno, Republic of Belarus). E-mail: 578211973@g.g.com.

Martynov Ivan Platonovich – D. Sc. (Physical and Mathematics), Professor. Yanka Kupala State University of Grodno (22, Ozheshko Str., 230020, Grodno, Republic of Belarus). E-mail: i.martynov@grsu.by.

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

ФИЗИКА
PHYSICS

УДК 544.478+544.227+615.281.9
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-2-157-163>

Поступило в редакцию 20.11.2018
Received 20.11.2018

**А. В. Баглов¹, Т. А. Шевцова¹, Л. С. Хорошко¹,
Н. В. Дудчик², Е. В. Дроздова², В. Е. Борисенко¹**

¹*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
Минск, Республика Беларусь*

²*Научно-практический центр гигиены, Минск, Республика Беларусь*

**ФОРМИРОВАНИЕ ИММОБИЛИЗОВАННОГО НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО
ДИОКСИДА ТИТАНА, ОБЛАДАЮЩЕГО АНТИБАКТЕРИАЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ**

(Представлено академиком В. А. Лабуновым)

Аннотация. Наноструктурированные покрытия из диоксида титана (TiO₂) сформированы на жестких алюминиевых и гибких стекловолоконных подложках золь-гель методом, модифицированным включением в золь нано- и субмикронных частиц TiO₂. Добавление в золь таких частиц приводит к образованию шероховатого покрытия из агломератов нано- и субмикронных частиц, скрепленных золь-гель синтезированным диоксидом титана. Антибактериальная активность полученных покрытий подтверждена в условиях облучения видимым светом светодиодного источника в течение 120 мин. Наибольшая активность продемонстрирована всеми образцами в отношении золотистого стафилококка.

Ключевые слова: диоксид титана, золь-гель метод, антибактериальная активность, наночастицы

Для цитирования: Формирование иммобилизованного наноструктурированного диоксида титана, обладающего антибактериальными свойствами / А. В. Баглов [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2019. – Т. 63, № 2. – С. 157–163. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-2-157-163>

**Aleksey V. Baglov¹, Tatiana A. Shevtsova¹, Liudmila S. Khoroshko¹,
Natalia V. Dudchik², Alena V. Drozdova², Victor E. Borisenko¹**

¹*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus*

²*Scientific Practical Centre of Hygiene, Minsk, Republic of Belarus*

**FORMING IMMOBILIZED NANOSTRUCTURED TITANIUM DIOXIDE
HAVING ANTIBACTERIAL PROPERTIES**

(Communicated by Academician Vladimir A. Labunov)

Abstract. Nanostructured titanium dioxide (TiO₂) coatings were formed on rigid aluminum and flexible fiberglass substrates using the sol-gel method modified by adding nano- and submicron TiO₂ particles to the sol. The use of sols with such particles leads to the formation of a rough coating of agglomerates of nano- and submicron particles bonded with sol-gel synthesized TiO₂. The antibacterial activity of the coatings was confirmed under irradiation with visible light from an LED source for 120 minutes. The most activity was demonstrated by all samples in relation to *Staphylococcus aureus*.

Keywords: titanium dioxide, sol-gel method, antibacterial activity, nanoparticles

For citation: Baglov A. V., Shevtsova T. A., Khoroshko L. S., Dudchik N. V., Drozdova A. V., Borisenko V. E. Forming immobilized nanostructured titanium dioxide having antibacterial properties. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2019, vol. 63, no. 2, pp. 157–163 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-2-157-163>

Введение. Диоксид титана (TiO_2) зарекомендовал себя оптимальным широкозонным полупроводником для использования в качестве фотокатализатора благодаря его термической стабильности, химической стойкости, широкой распространенности, безвредности для человека и окружающей среды [1; 2]. Наноструктурированный TiO_2 проявляет высокую фотокаталитическую активность как при разложении органических соединений [3–5], так и при обеззараживании воды [4]. Однако он обладает довольно широкой запрещенной зоной (около 3,2 эВ для фазы анатаз), что накладывает определенные ограничения на спектр активирующих фотокатализатор источников излучения. Фотокатализаторы используют как в порошковом виде, диспергируя их в очищаемом растворе с последующей фильтрацией раствора после процесса очистки, так и в виде иммобилизованного покрытия на пассивной подложке.

В условиях фиксированного набора доступных источников излучения повышение фотокаталитической активности иммобилизованного фотокатализатора может быть достигнуто путем увеличения эффективной площади поверхности покрытия. Ранее мы продемонстрировали в [6], что формирование пленок с инкорпорированными нано- и субмикронными частицами TiO_2 позволяет значительно повысить их фотокаталитическую активность в отношении модельного красителя Родамин Б, ожидая аналогичного эффекта и в отношении антибактериальных свойств таких покрытий.

Антибактериальная активность фотокаталитически активных материалов обусловлена образованием свободных радикалов в результате взаимодействия фотогенерированных носителей заряда с ионами и молекулами очищаемой среды. Поверхность бактерий, как правило, имеет отрицательный заряд при биологических значениях pH, что способствует адсорбции радикалов на их поверхности с одновременной адсорбцией бактерий на положительно заряженных поверхностях. Поверхность микро- и наночастиц TiO_2 при нейтральных pH среды имеет отрицательный заряд. Их взаимодействие с бактериями обусловлено образованием водородных связей и катионных мостиков. Зависимость этих процессов от структуры поверхностного слоя катализатора и материала подложки представляет и научный, и практический интерес.

Целью проведенных нами исследований явилось определение антибактериальных свойств покрытий из наноструктурированного TiO_2 , сформированных золь-гель методом на жестких подложках из алюминия и гибких подложках из стекловолокна. Полученные результаты приведены в данном сообщении.

Материалы и методы исследования. В качестве жесткой подложки использовали алюминий технической чистоты толщиной 1 мм. Гибкой подложкой служило стекловолокно ЭЗ-200, состоящее из скрученных нитей алюмоборосиликатного стекла диаметром не более 20 мкм. Из них вырезали образцы размером 35×35 мм.

Предварительная очистка подложек из алюминия включала отмывку в изопропиловом спирте для удаления органических загрязнений и травление поверхности в 10 %-ном водном растворе гидроксида натрия (NaOH) для удаления поверхностного слоя естественного оксида алюминия и неорганических загрязнений. После каждого этапа химической обработки образцы тщательно промывали в дистиллированной воде и высушивали в потоке теплого (около 70 °С) воздуха. Часть очищенных алюминиевых подложек подвергали микроструктурированию поверхности с помощью химического травления в хлорсодержащем травителе по методике из работы [7] в течение 3,5 мин. Подготовка подложек из стекловолокна включала обезжиривание обработкой в ацетоне, отмывку в дистиллированной воде и сушку теплым воздухом.

Покрытия на всех подложках формировали с использованием двух золей – без диспергированных частиц и с диспергированными коммерческими нано- и субмикронными частицами TiO_2 с кристаллической структурой анатаза. Золь без частиц – базовый состав – включал 4 г этанола ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) и 4 г н-бутанола ($\text{C}_4\text{H}_9\text{OH}$) в качестве дисперсионной среды золя, 0,18 г ацетилацетона ($\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_2$) в качестве стабилизатора, 0,85 г тетраизопропоксида титана ($\text{Ti}\{\text{OCH}(\text{CH}_3)_2\}_4$) в качестве прекурсора. В него добавляли 0,11 г дистиллированной воды для гидролиза прекурсора. В приготовленный таким образом базовый золь добавляли порошок из смеси наночастиц (Evonik P90) и субмикронных частиц TiO_2 в пропорции 1 : 1 в количестве 7,4 вес. %. Перед нанесением золя с диспергированными в нем частицами TiO_2 на подложки проводили его гомогенизацию переме-

шиванием на встряхивателе IKA Vortex 4 Digital с орбитальной траекторией встряхивания диаметром 4,5 мм в течение 1 ч.

Формирование покрытия на подложках осуществляли методом их окунания в два этапа. Сначала подложку погружали на 1 мин в непрерывно перемешиваемый на встряхивателе базовый золь. После ее извлечения избыток золя на боковых поверхностях удаляли бумажным фильтром. Затем подложку размещали горизонтально на кварцевом стекле с температурой 200 °С и высушивали на воздухе в течение 3 мин. Затем аналогичным образом наносили второй слой золя с диспергированными нано- и субмикронными частицами, после чего подложки с покрытием подвергали термообработке в муфельной печи при 500 °С на воздухе в течение 30 мин.

Анализ структуры поверхности образцов осуществляли методом растровой электронной микроскопии (РЭМ). Фазовый состав сформированных покрытий определяли рентгеновским дифракционным анализом (РДА) в дифрактометре ДРОН-4 ($\lambda = 1,54179 \text{ \AA}$).

Антибактериальную активность сформированных покрытий определяли путем погружения подложек с исследуемыми покрытиями в раствор с тест-культурами вегетативных клеток и облучения поверхности покрытия светом видимого спектрального диапазона. В качестве тест-культур использовали кишечную палочку (*Escherichia coli*), золотистый стафилококк (*Staphylococcus aureus*) и синегнойную палочку (*Pseudomonas aeruginosa*). Облучение 50 мл стандартного раствора с каждой из этих культур и помещенной в них подложки с фотокатализатором осуществляли расположенной в 9,5 см от тестируемого образца светодиодной лампой видимого диапазона мощностью 10 Вт и цветовой температурой 4000 К. Оценку численности популяции микроорганизмов после светового воздействия осуществляли методом посева 0,1–1 мл тест-культуры на поверхность дифференциально-диагностических питательных сред, помещенных в чашки Петри. Использовали среду Эндо для *Escherichia coli*, желточно-солевой агар для *Staphylococcus aureus*, цитримидный агар для *Pseudomonas aeruginosa*. Посевы культивировали при оптимальной температуре 35–37 °С в течение 18–36 ч. После культивирования определяли количество колоний, имеющих типичные морфологические признаки, с последующим пересчетом колониеобразующих единиц на 1 мл раствора (КОЕ/мл). В качестве количественной оценки образующихся колоний брали среднее значение для трех идентичных по условиям культивирования чашек Петри [8].

Результаты и их обсуждение. Травление поверхности алюминия в течение 3,5 мин привело к удалению слоя алюминия толщиной около 50 мкм и образованию губкообразной неоднородной поверхности с углублениями диаметром 10–30 мкм и глубиной до 15 мкм. Стенки крупных углублений дополнительно имеют области протрава размером в единицы мкм (рис. 1). При большом увеличении (рис. 1, *b*) различима внутренняя слоистая структура алюминия, образованная при прокате фольги. Фото гладкой алюминиевой подложки мы не приводим из-за отсутствия значимых особенностей.

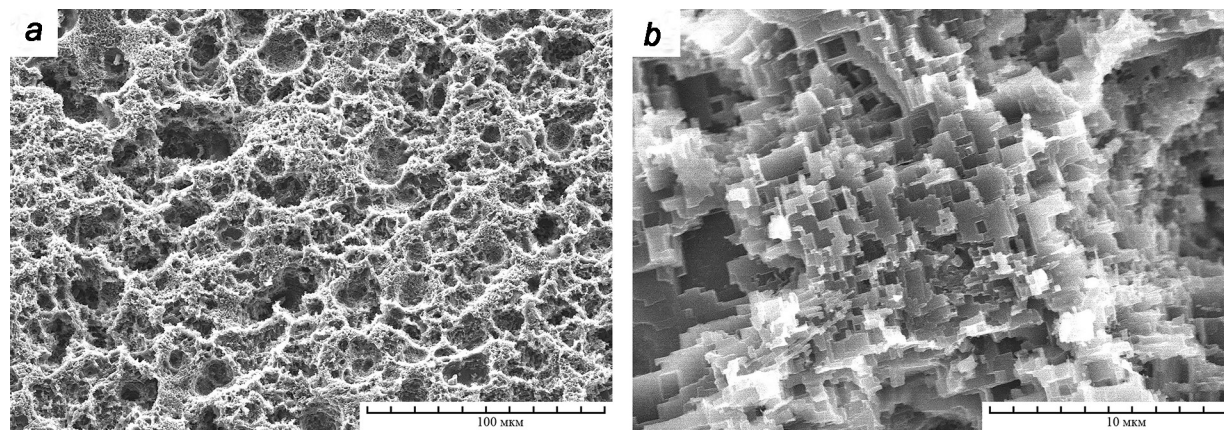


Рис. 1. Поверхность микроструктурированной подложки из алюминия. Увеличение: *a* – $\times 500$; *b* – $\times 5000$

Fig. 1. Surface view of microstructured aluminum substrate. Magnification: *a* – $\times 500$; *b* – $\times 5000$

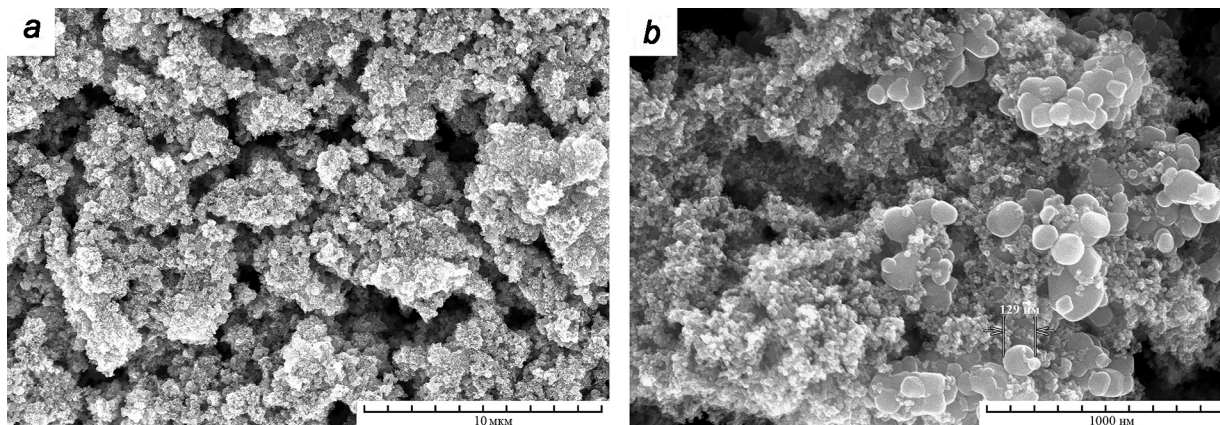


Рис. 2. Поверхность наноструктурированного покрытия, полученного из золя с диспергированными коммерческими нано- и субмикронными частицами TiO_2 . Увеличение: $a - \times 5000$, $b - \times 50000$

Fig. 2. Surface view of nanostructured coating fabricated from the sol with dispersed commercial nano- and submicron TiO_2 particles. Magnification: $a - \times 5000$, $b - \times 50000$

На гладких и микроструктурированных алюминиевых подложках после отжига ксерогеля образовалось шероховатое покрытие, состоящее из агломератов нано- и субмикронных частиц размером до 8 мкм, скрепленных диоксидом титана из золя (рис. 2). Толщина покрытий составляет 3–5 мкм, что больше, чем было получено нами ранее [6]. Это связано с горизонтальной ориентацией образцов во время нанесения золя, благодаря чему на поверхность подложки оседают частицы из слоя золя над образцом. Седиментация приводит к накоплению части субмикронных частиц в нижней части покрытия, что объясняет малое количество субмикронных частиц на его поверхности.

Ранее нами было показано [9], что микроструктурирование поверхности подложки увеличивает фотокаталитическую активность таких покрытий за счет увеличения неоднородности

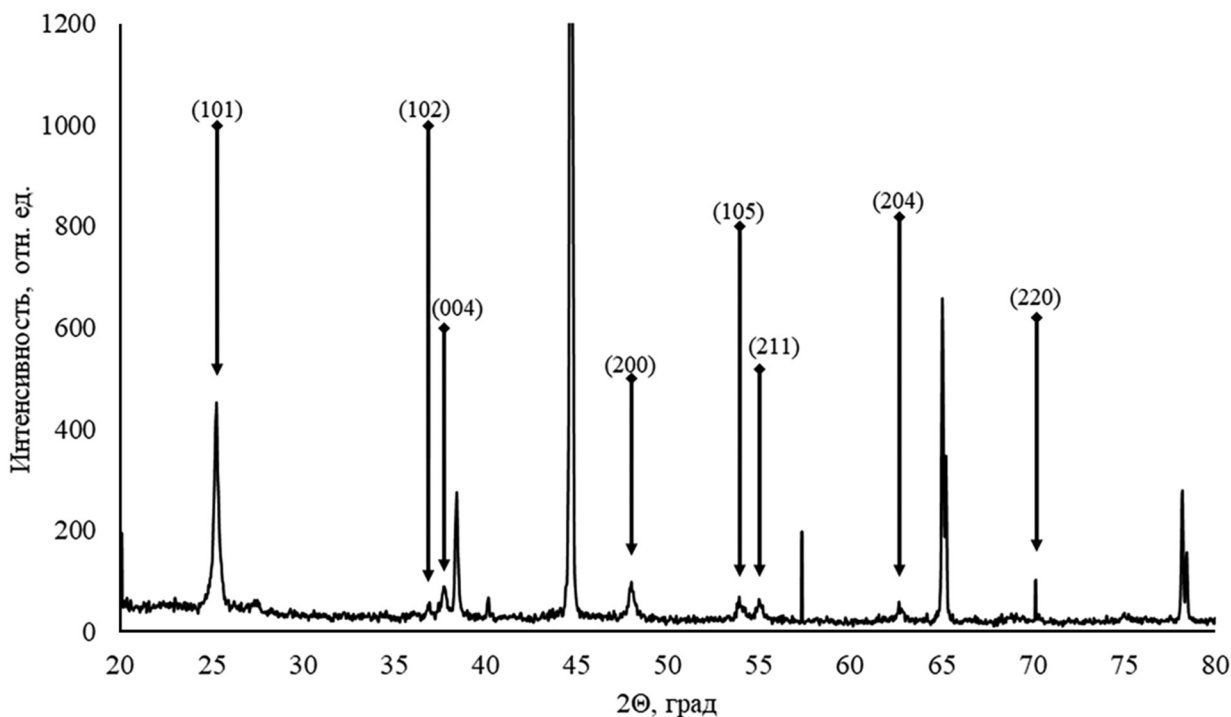


Рис. 3. Рентгеновская дифрактограмма покрытия из TiO_2 с нано- и субмикронными частицами на алюминиевой подложке. В скобках обозначены индексы Миллера для анатаза

Fig. 3. XRD spectrum of TiO_2 coating with nano- and submicron particles on aluminum substrate. There are Miller's indexes for anatase in parentheses

рельефа. Однако, как установлено в выполненных экспериментах, с увеличением толщины покрытия после 3 мкм происходит выравнивание рельефа его поверхности, который становится практически независимым от шероховатости поверхности подложки. Покрытия, сформированные из базового золя (без нано- и субмикронных частиц), имели сравнительно гладкую поверхность.

Результаты рентгеновского исследования фазового состава сформированных покрытий приведены на рис. 3. На нем обозначены рефлексы, принадлежащие TiO_2 с кристаллической решеткой анатаза. Рефлексы без обозначения принадлежат алюминиевой подложке. Кристаллизация TiO_2 в анатаз полная, нет шумов, связанных с рентгеноаморфной фазой, а также рефлексов от рутила и брукита. Кристаллиты анатаза с ориентацией (101) являются основным компонентом полученного покрытия.

Формирование TiO_2 покрытий на гибкой стекловолоконной подложке проводили по той же методике. По результатам исследования РЭМ принципиальных отличий в структуре покрытий не обнаружено, за исключением большей неоднородности в толщине и наличия агломератов частиц, ограниченных замкнутыми областями, образованными нитями ткани. Проведенный рентгеновский анализ не показал отличий в фазовом составе полученных покрытий.

Оценку антибактериальной активности проводили в условиях описанного выше модельного эксперимента с временем экспозиции 120 мин. Критериально значимым принимали фактор редукции $R_{120} = \lg_0 - \lg_{120}$, где \lg_0 – логарифм количества клеток в начале экспозиции (\lg КОЕ/мл), \lg_{120} – логарифм количества клеток через 120 мин (\lg КОЕ/мл). Полученные результаты обобщены в таблице.

Антибактериальная активность покрытий из наноструктурированного диоксида титана

Antibacterial activity of nanostructured titanium dioxide coatings

Тест-модель Test-model	Фактор редукции R_{120} Reduction factor R_{120}		
	Гладкий алюминий Smooth aluminum	Микроструктурированный алюминий Microstructured aluminum	Стекловолоконно Fiberglass
<i>Escherichia coli</i>	1,5	2,0	0,6
<i>Staphylococcus aureus</i>	2,5	2,8	3,1
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	1,3	1,2	0,9
Консорциум микроорганизмов microorganism consortium <i>E. coli</i> : <i>S. aureus</i> : <i>P. aeruginosa</i> (1 : 1 : 1)	0,4	0,6	0,6

Все образцы продемонстрировали антибактериальную активность в отношении используемых бактериальных культур. В отношении *Escherichia coli* и *Pseudomonas aeruginosa* покрытия на алюминиевой подложке показали лучшую активность, а в случае *Staphylococcus aureus* лучшую активность продемонстрировали покрытия на стекловолокне. В случае консорциума культур покрытия на микроструктурированной подложке и стекловолокне показали одинаковый результат, превосходящий результат покрытия на гладкой алюминиевой подложке. Мы полагаем, что повышенная активность покрытий на стекловолокне в отношении *Staphylococcus aureus* связана со случайными факторами, например, попаданием в высеваемую тест-культуру мелкодисперсных частиц диоксида титана с поверхности волокон, так как гибкая подложка даже при малых деформациях способна нарушать целостность покрытия. Лучшая активность в случае микроструктурированной алюминиевой подложки может быть связана с несколько большей шероховатостью поверхности, плохо различимой на РЭМ-снимках, но влияющую на активность в масштабе всего образца.

Заключение. Предложена простая и эффективная золь-гель технология формирования наноструктурированных покрытий из диоксида титана на жестких алюминиевых и гибких стекловолоконных подложках. Включение в состав исходного золя нанометровых и субмикронных частиц уже сформированного в фазе анатаза TiO_2 повышает шероховатость поверхности покрытия, обеспечивая тем самым его повышенную антибактериальную активность. Наибольшую из исследованных антибактериальную активность имеют покрытия на микроструктурированном

алюминии, что позволяет рекомендовать их как опытный образец для дальнейших углубленных исследований с целью оценки безопасности для здоровья человека при практическом использовании в системах фотокаталитической очистки воды и воздуха от патогенных и условно-патогенных бактерий.

Благодарности. Работа выполнена в рамках ГПНИ «Конвергенция–2020», задания 3.05 (№ 20163900, 20163533 и 20161869). Авторы выражают благодарность А. А. Малашевичу за рентгеновский дифракционный анализ образцов.

Acknowledgement. The work is supported by the SPSI “Convergence–2020”, the tasks 3.05 (no. 20163900, 20163533 and 20161869). We are grateful to A. A. Malashevich for XRD analysis of samples.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Gupta, S. M. A Review of TiO₂ Nanoparticles / S. M. Gupta, M. Tripathi // *Chinese Sci. Bull.* – 2011. – Vol. 56, N 16. – P. 1639–1657. <https://doi.org/10.1007/s11434-011-4476-1>
2. Wang, C.-T. Titania Nanocomposite Thin Films with Enhanced Photovoltaic Efficiency: Effects of Ti-Alkoxide Sol and Compact Layer / C.-T. Wang, C.-F. Yen // *Surface & Coatings Technology.* – 2012. – Vol. 206, N 8–9. – P. 2622–2627. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.11.025>
3. Photocatalytic properties of nanostructured titanium dioxide / O. V. Kupreeva [et al.] // *J. Appl. Spectroscopy.* – 2013. – Vol. 79, N 6. – P. 1010–1013. <https://doi.org/10.1007/s10812-013-9706-7>
4. Heterogeneous photocatalysis in titania-containing liquid foam / D. G. Shchukin [et al.] // *Photochemical & Photobiological Sciences.* – 2004. – Vol. 3, N 2. – P. 157–159. <https://doi.org/10.1039/b313935b>
5. Photocatalytic destruction of tetracycline hydrochloride on the surface of titanium dioxide films modified by gold nanoparticles / O. P. Linnik [et al.] // *J. Appl. Spectroscopy.* – 2015. – Vol. 81, N 6. – P. 990–995. <https://doi.org/10.1007/s10812-015-0040-0>
6. Photocatalytic activity of nanostructured titania coatings on aluminum substrates / A. V. Baglov [et al.] // *Inorganic Materials.* – 2017. – Vol. 53, N 11. – P. 1180–1184. <https://doi.org/10.1134/s0020168517110036>
7. Baglov, A. V. Formation of the microrelief on aluminum surface by chemical etching / A. V. Baglov, L. S. Khoroshko // XIIth International Conference “Electronics and Applied Physics”: proceedings of the EAP’2016. – Kyiv, 2016. – P. 59–60.
8. Дудчик, Н. В. Тест-модель и количественный критериальный показатель для оценки антимикробного потенциала наноматериалов, используемых для водоочистки и водоподготовки: обоснование и метрологическая оценка / Н. В. Дудчик, Е. В. Дроздова, С. И. Сычик // *Анализ риска здоровью.* – 2018. – № 3. – С. 104–111. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2018.3.11>
9. Baglov, A. V. Tuning the structure and photocatalytic activity of TiO₂ sol-gel fabricated films by incorporation of nano- and submicron particles / A. V. Baglov, N. M. Denisov // International Conference “Nanomeeting–2017”: Proceedings of International Conference Nanomeeting–2017. – Singapore, 2017. – P. 274–278. https://doi.org/10.1142/9789813224537_0063

References

1. Gupta S. M., Tripathi M. Review of TiO₂ nanoparticles. *Chinese Science Bulletin*, 2011, vol. 56, no. 16, pp. 1639–1657. <https://doi.org/10.1007/s11434-011-4476-1>
2. Wang C.-T., Yen C.-F. Titania Nanocomposite Thin Films with Enhanced Photovoltaic Efficiency: Effects of Ti-Alkoxide Sol and Compact Layer. *Surface and Coatings Technology*, 2012, vol. 206, no. 8–9, pp. 2622–2627. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.11.025>
3. Kupreeva O. V., Lazarouk S. K., Borisenko V. E., Kun L., Kang T. Photocatalytic properties of nanostructured titanium dioxide. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2013, vol. 79, no. 6, pp. 1010–1013. <https://doi.org/10.1007/s10812-013-9706-7>
4. Shchukin D. G., Ustinovich E. A., Kulak A. I., Sviridov D. V. Heterogeneous photocatalysis in titania-containing liquid foam. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 2004, vol. 3, no. 2, pp. 157–159. <https://doi.org/10.1039/b313935b>
5. Linnik O. P., Zhukovskiy M. A., Starukh G. N., Smirnova N. P., Gaponenko N. V., Asharif A. M., Khoroshko L. S., Borisenko V. E. Photocatalytic destruction of tetracycline hydrochloride on the surface of titanium dioxide films modified by gold nanoparticles. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2015, vol. 81, no. 6, pp. 990–995. <https://doi.org/10.1007/s10812-015-0040-0>
6. Baglov A. V., Denisov N. M., Borisenko V. E., Uglov V. V., Malashevich A. A. Photocatalytic activity of nanostructured titania coatings on aluminum substrates. *Inorganic Materials*, 2017, vol. 53, no. 11, pp. 1180–1184. <https://doi.org/10.1134/s0020168517110036>
7. Baglov A. V., Khoroshko L. S. Formation of the microrelief on aluminum surface by chemical etching. *XIIth International Conference “Electronics and Applied Physics”: Proceedings of the EAP’2016*. Kyiv, 2016, pp. 59–60.
8. Dudchik N. V., Drozdova E. V., Sychik S. I. Test-model and quantitative R_{DDS} criterion index which are applied to estimate antimicrobial potential of nanomaterials used for water purification and treatment: substantiation and metrologic assessment. *Analiz riska zdorov’yu = Health Risk Analysis*, 2018, no. 3, pp. 104–111 (in Russian). <https://doi.org/10.21668/health.risk/2018.3.11.eng>
9. Baglov A. V., Denisov N. M. Tuning the structure and photocatalytic activity of TiO₂ sol-gel fabricated films by incorporation of nano- and submicron particles. *International Conference “Nanomeeting–2017”: Proceedings of International Conference Nanomeeting–2017*. Singapore, 2017, pp. 274–278. https://doi.org/10.1142/9789813224537_0063

Информация об авторах

Баглов Алексей Викторович – науч. сотрудник. Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (ул. П. Бровка, 6, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: baglov@bsuir.by.

Шевцова Татьяна Александровна – аспирант. Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (ул. П. Бровка, 6, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: filippova.tatyana.a@gmail.com.

Хорошко Людмила Сергеевна – канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник. Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (ул. П. Бровка, 6, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: l_khoroshko@bsuir.by.

Дудчик Наталья Владимировна – д-р биол. наук, доцент, заведующий лабораторией. Научно-практический центр гигиены (ул. Академическая, 8, 220012, Минск, Республика Беларусь). E-mail: n_dudchik@tut.by.

Дроздова Елена Валентиновна – канд. мед. наук, доцент, заведующий лабораторией. Научно-практический центр гигиены (ул. Академическая, 8, 220012, Минск, Республика Беларусь). E-mail: drozdovaev@mail.ru.

Борисенко Виктор Евгеньевич – д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой. Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (ул. П. Бровка, 6, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: borisenko@bsuir.by.

Information about the authors

Baglov Aleksey Victorovich – Researcher. Belarusian State University Informatics and Radioelectronics (6, P. Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: baglov@bsuir.by.

Shevtsova Tatiana Aleksandrovna – Postgraduate student. Belarusian State University Informatics and Radioelectronics (6, P. Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: filippova.tatyana.a@gmail.com.

Khoroshko Liudmila Sergeevna – Ph. D. (Physics and Mathematics), Researcher. Belarusian State University Informatics and Radioelectronics (6, P. Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: l_khoroshko@bsuir.by.

Dudchik Natalia Vladimirovna – D. Sc. (Biology), Associate professor, Head of the Laboratory. Scientific Practical Center of Hygiene (8, Akademicheskaya Str., 8, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: n_dudchik@tut.by.

Drozdova Alena Valentinovna – Ph. D. (Medicine), Associate professor, Head of the Department. Scientific Practical Center of Hygiene (8, Akademicheskaya Str., Minsk, Republic of Belarus). E-mail: drozdovaev@mail.ru.

Borisenko Victor Evgenievich – D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Department. Belarusian State University Informatics and Radioelectronics (6, P. Brovka Str., Minsk, Republic of Belarus). E-mail: borisenko@bsuir.by.

ХИМИЯ
CHEMISTRYУДК 541.183
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-2-164-168>Поступило в редакцию 13.09.2018
Received 13.09.2018**Е. Г. Косандрович, Л. Н. Шаченкова, академик В. С. Солдатов***Институт физико-органической химии Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь***РАСПРЕДЕЛЕНИЕ АММИАКА, МОНО-, ДИ- И ТРИЭТИЛАМИНА
В СИСТЕМЕ «ВОДНЫЙ РАСТВОР–ГАЗОВАЯ ФАЗА»**

Аннотация. В статических условиях исследовано равновесное распределение аммиака, этиламина, диэтиламина и триэтиламина между их водными растворами и газовой фазой при $25 \pm 0,1$ °С. На основании полученных результатов, путем комбинирования уравнений закона Генри и констант ионизации, рассчитаны константы Генри указанных соединений с учетом их взаимодействия с водой. Закон Генри соблюдается, по крайней мере, в интервале концентраций аминов в воздухе 0–200 мг/м³.

Ключевые слова: аммиак, этиламин, диэтиламин, триэтиламин, константа Генри

Для цитирования. Косандрович, Е. Г. Распределение аммиака, моно-, ди- и триэтиламина в системе «водный раствор–газовая фаза» / Е. Г. Косандрович, Л. Н. Шаченкова, В. С. Солдатов // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2019. – Т. 63, № 2. – С. 164–168. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-2-164-168>

Evgenii G. Kosandrovich, Larisa N. Shachenkova, Academician Vladimir S. Soldatov*Institute of Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus***DISTRIBUTION OF AMMONIA, MONO-, DI- AND TRIETHYLAMINE
IN THE WATER SOLUTION–GAS PHASE SYSTEM**

Abstract. The equilibrium distribution of ammonia, ethylamine, diethylamine and triethylamine between their aqueous solutions and the gas phase at 25 ± 0.1 °C have been investigated under equilibrium conditions. Based on the results obtained (using the equations of Henry's law and the ionization constant), Henry's constants for these substances have been calculated with the consideration of their interaction with water. It was established that Henry's law is valid, at least, in the range of amine concentrations in the air 0–200 mg/m³.

Keywords: ammonia, ethylamine, diethylamine, triethylamine, Henry's constant

For citation: Kosandrovich E. G., Shachenkova L. N., Soldatov V. S. Distribution of ammonia, mono-, di- and triethylamine in the water solution–gas phase system. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2019, vol. 63, no. 2, pp. 164–168 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-2-164-168>

Введение. Распределение летучего вещества между газовой фазой и жидкостью описывается эмпирическим законом Генри [1], по которому растворимость газообразного вещества в жидкости C_L (моль/л) прямо пропорциональна парциальному давлению этого вещества в газовой фазе P_G (Па):

$$C_L = K_{\text{Henry}} P_G, \quad (1)$$

где K_{Henry} – константа Генри.

Это предельный закон, строго справедливый для идеальных растворов и $P_G \rightarrow 0$, но с достаточной точностью соблюдающийся в широкой области парциальных давлений. На практике чаще

применяются аналоги (1), в которых парциальное давление заменяется на пропорциональную ему концентрацию распределяющегося компонента газовой фазы. В зависимости от области использования этого закона, концентрации в обеих фазах могут быть выражены в различных единицах и в литературе можно встретить различные численные значения констант, производных от константы K_{Henry} в (1).

Это уравнение имеет следующие ограничения: оно относится к постоянной температуре и к межфазному распределению веществ, не вступающих в химические взаимодействия с жидкостью. В справочной и научной литературе имеется много данных о константе Генри для наиболее распространенных газов в равновесии с водой, особенно для веществ, имеющих технологическое или биологическое значение (например: оксид углерода, углеводороды, азот, кислород и др.).

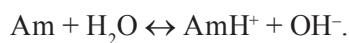
В последнее время актуализировались вопросы, связанные с очисткой дыхательного воздуха от токсичных и дурно-пахнущих примесей в различных отраслях (микроэлектроника, сельское хозяйство и т. д.) [2–4]. К таким веществам относятся и этиламины, рассматриваемые в настоящем сообщении. Данные по константам Генри для их распределения между водой и воздухом отсутствуют.

В наших предыдущих работах было показано, что наиболее эффективными сорбентами воздушных примесей различной природы являются волокнистые иониты [5–7]. При этом разнообразие областей и условий применения свидетельствует о необходимости теоретической оценки эффективности очистки, а также величины сорбции этих соединений в каждом конкретном случае, так как экспериментальное определение данных параметров требует длительного времени и больших трудозатрат. Нами разработана теоретическая модель [8; 9], позволяющая априорно рассчитывать эффективность очистки воздуха от таких примесей в зависимости от их концентрации и влажности воздуха. В качестве основного параметра в ней используются константы Генри. Они были определены в настоящей работе для аммиака, моно-, ди- и триэтиламина и будут применены в дальнейшем для расчета оптимальных и граничных условий использования волокнистых ионитов при очистке воздуха от этих веществ.

Материалы и методы исследования. В колбу емкостью 1 л помещали 300 мл водного раствора целевого соединения, герметично закрывали и выдерживали в термостате при $25 \pm 0,1$ °C в течение 7 сут. После установления равновесия производили анализ концентрации вещества в равновесной газовой (с использованием газоанализатора КОЛИОН-1В) и водной (с использованием С-анализатора Multi N/C UV HS) фазах.

Результаты и их обсуждение. В таблице представлены первичные экспериментальные данные по зависимости концентрации исследуемых веществ в газовой фазе от их равновесной концентрации в растворе при $25 \pm 0,1$ °C.

Аммиак и его алкильные производные (Am) взаимодействуют с водой образуя положительно заряженные ионы (AmH^+):



Аммиак и амины в водной фазе присутствуют в свободной [Am] и ионизированной [AmH^+] формах. В газовой фазе они присутствуют только в непротонизированном состоянии. Закон Генри устанавливает взаимосвязь между концентрацией вещества в газовой фазе и молекулярной (неионизированной) формой этого вещества в водной фазе. Поэтому напрямую полученные экспериментальные данные (таблица) для расчета константы Генри использовать нельзя, так как часть аммиака и этиламинов в водном растворе находится в ионизированной форме, а экспериментальные данные отражают суммарное содержание всех форм соединения в растворе. Взаимосвязь между ионизированной (AmH^+) и неионизированной (Am) формой аммиака или аминов выражается константой равновесия K_b :

$$K_b = [\text{AmH}^+][\text{OH}^-] / [\text{Am}] \sim [\text{AmH}^+]^2 / [\text{Am}]. \quad (2)$$

Численное значение данной константы известно из справочной литературы [11] и характеризует кислотно-основные свойства рассматриваемых веществ: аммиак – $K_b = 1,78 \cdot 10^{-5}$ моль/дм³; этиламин – $K_b = 5,62 \cdot 10^{-4}$ моль/дм³; диэтиламин – $K_b = 9,55 \cdot 10^{-4}$ моль/дм³; триэтиламин – $K_b = 7,41 \cdot 10^{-4}$ моль/дм³.

**Равновесные концентрации аммиака, этиламина, диэтиламина, триэтиламина
в водной и газовой фазе при $25 \pm 0,1$ °C**

**Equilibrium concentrations of ammonia, ethylamine, diethylamine, triethylamine
in the aqueous and gas phase at 25 ± 0.1 °C**

Соединение Compound	Равновесная концентрация в растворе, мг/л Equilibrium concentration in the solution, mg/l	Равновесная концентрация в воздухе, мг/м ³ Equilibrium concentration in the air, mg/m ³
Аммиак*	15	10,0
	110	75,0
	165	120,0
	230	170,0
Этиламин	35	3,1
	120	21,6
	298	86,3
	430	152,5
Диэтиламин	50	23,6
	104	75,0
	184	143,0
	245	179,0
Триэтиламин	43	7,2
	61	18,5
	183	101,0
	266	170,0

Примечание. * – расчетные значения получены по эмпирической формуле из [10].
Note. * – the calculated values are obtained by the empirical formula presented in [10].

Общая концентрация аммиака или аминов ($[Am^{total}]$) в растворе является суммой ионизированной и неионизированной форм и численно равна экспериментально определенной концентрации в растворе (таблица)

$$[Am^{total}] = [AmH^+] + [Am]. \quad (3)$$

Выражая $[AmH^+]$ из (3), подставляя его в (2) и раскрывая выражение в конечном итоге получаем

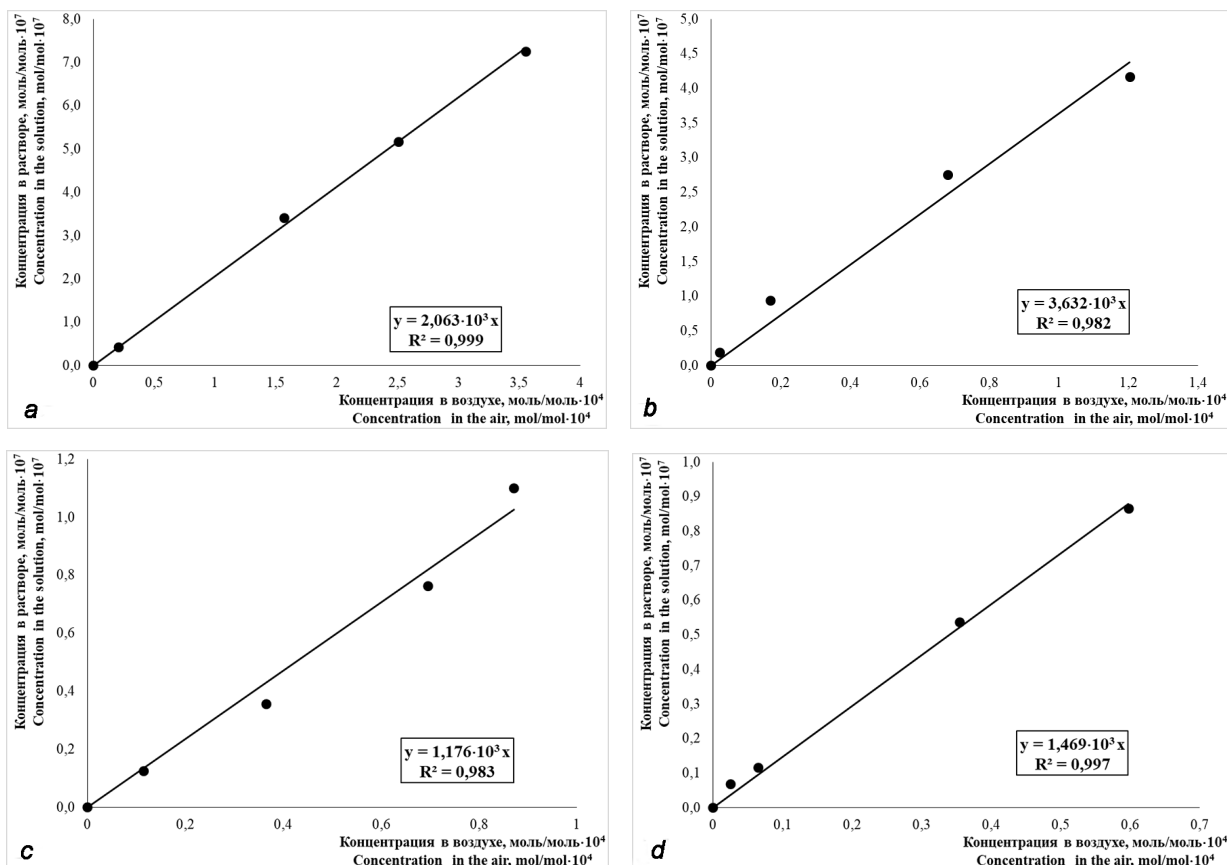
$$[Am]^2 - (2[Am^{total}] + K_b)[Am] + [Am^{total}]^2 = 0. \quad (4)$$

Решая полученное квадратное уравнение, определяем равновесные концентрации неионизированного аммиака или амина ($[Am]$) в каждом конкретном случае, с использованием которых рассчитываем константу Генри. Результаты расчетов представлены в виде графиков на рисунке. Следует обратить внимание на следующее:

1) при решении полученного квадратного уравнения (4) во всех случаях получаем два вещественных корня, один из которых отбрасывается, так как не имеет физического смысла: при нулевой общей концентрации аммиака или амина в растворе ($[Am^{total}] = 0$) он имеет отличное от нуля значение;

2) при расчетах константы Генри концентрации компонентов в газовой фазе выражены в моль/моль воздуха, в растворе – в моль/моль воды.

Как следует из представленных на рисунке результатов, полученные закономерности имеют линейный характер с коэффициентом детерминации R^2 не ниже 0,982 (рисунок), что свидетельствует о правомерности использования закона Генри для всех веществ в исследованном концентрационном диапазоне (при концентрациях аммиака или аминов в воздухе от 0 до 200 мг/м³, представляющих наибольший интерес с практической точки зрения ионообменной очистки воздуха). Константа K_{Henry} определена как коэффициент k линейного уравнения $y = kx$ (уравнение представлено на графиках рисунка; для нашей системы оно соответствует (1) с концентрациями компонентов в обеих фазах выраженных в моль/моль). Таким образом, константа K_{Henry} (моль/моль) равна: 1) аммиак – $2,063 \cdot 10^3$; 2) этиламин – $3,632 \cdot 10^3$; 3) диэтиламин – $1,176 \cdot 10^3$; 4) триэтиламин – $1,469 \cdot 10^3$.



Зависимость концентрации неионизированных форм аммиака и аминов в растворе от их концентрации в воздухе при $25 \pm 0,1$ °C: *a* – аммиак; *b* – этиламин; *c* – диэтиламин; *d* – триэтиламин

Dependence of the concentration of non-ionized forms of ammonia and amines in solution on their concentration in the gas phase at 25 ± 0.1 °C: *a* – ammonia; *b* – ethylamine; *c* – diethylamine; *d* – triethylamine

Заклучение. В статических условиях исследовано равновесное распределение аммиака, этиламина, диэтиламина и триэтиламина между их водными растворами и газовой фазой при $25 \pm 0,1$ °C. На основании полученных результатов, путем комбинирования уравнений закона Генри и констант ионизации, рассчитаны константы Генри указанных соединений с учетом их взаимодействия с водой. Константа K_{Henry} (моль/моль) равна: 1) аммиак – $2,063 \cdot 10^3$; 2) этиламин – $3,632 \cdot 10^3$; 3) диэтиламин – $1,176 \cdot 10^3$; 4) триэтиламин – $1,469 \cdot 10^3$. Закон Генри соблюдается, по крайней мере, в интервале концентраций 0–200 мг/м³ (акцент на данном концентрационном диапазоне обусловлен тем, что в практике ионитной воздухоочистки практически все проблемы загрязненного воздуха, требующие решения, находятся внутри него), о чем свидетельствует линейность зависимости концентрации аммиака и аминов в растворе от их концентрации в воздухе с коэффициентом детерминации R^2 не ниже 0,982.

Список использованных источников

1. William, H. Experiments on the Quantity of Gases Absorbed by Water, at Different Temperatures, and under Different Pressures / H. William // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. – 1803. – Vol. 93. – P. 29–276. <https://doi.org/10.1098/rstl.1803.0004>
2. Gostelov, P. Odour measurements for sewage treatment works / P. Gostelov, S. A. Parsons, R. M. Stuetz // Water Research. – 2001. – Vol. 35, N 3. – P. 579–597. [https://doi.org/10.1016/s0043-1354\(00\)00313-4](https://doi.org/10.1016/s0043-1354(00)00313-4)
3. Hayes, E. T. Odour and ammonia emissions from intensive pig units in Ireland / E. T. Hayes, T. P. Curran, V. A. Dodd // Bioresource Technology. – 2006. – Vol. 97, N 7. – P. 940–948. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.04.023>
4. Removal of methylamine from air by means of fibrous ion exchangers / H. Wasag [et al.] // III Ogolnopolski Kongres Inzynierii Srodowiska. – Lublin, 2009. – Vol. 59, N 2. – P. 247–253.
5. Soldatov, V. S. Ion exchangers for air purification / V. S. Soldatov, E. G. Kosandrovich // Ion exchange and solvent extraction, A series of advances. – 2011. – Vol. 20. – P. 45–115. <https://doi.org/10.1201/b10813-3>

6. Косандрович, Е. Г. Сорбция первичных, вторичных и третичных этиламинов из воздуха волокнистыми ионитами. 1. Сильнокислотный сульфокатионит ФИБАН К-1 / Е. Г. Косандрович // Весці Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2014. – № 4. – С. 11–15.
7. Сорбция первичных, вторичных и третичных этиламинов из воздуха волокнистыми ионитами. 2. Слабокислотный карбоксильный катионит ФИБАН К-4 / О. Н. Дорошкевич [и др.] // Весці Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2014. – № 4. – С. 16–20.
8. Soldatov, V. S. Chemical equilibria between the ion exchanger and gas phase / V. S. Soldatov, E. G. Kosandrovich // *Recent advances in Ion Exchange Theory and Practice*. – Cambridge, 2008. – P. 103–110.
9. Солдатов, В. С. Теоретическое описание сорбционных равновесий в системах ионит–газ / В. С. Солдатов, Е. Г. Косандрович // *Химия и технология новых веществ и материалов: сб. науч. тр.* – Минск, 2008. – С. 206–228.
10. Мелвин-Хьюз, Э. А. Физическая химия / пер. с англ. Е. Н. Еремина, О. М. Полторака, Ю. В. Филиппова; под общ. ред. Я. И. Герасимова. – М., 1962. – 1148 с.
11. Сиггиа, С. Количественный органический анализ по функциональным группам / С. Сиггиа, Дж. Г. Ханна. – М., 1983. – 405 с.

References

1. William H. Experiments on the Quantity of Gases Absorbed by Water, at Different Temperatures, and under Different Pressures. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1803, vol. 93, pp. 29–276. <https://doi.org/10.1098/rstl.1803.0004>
2. Gostelov P., Parsons S. A., Stuetz R. M. Odour measurements for sewage treatment works. *Water Research*, 2001, vol. 35, no. 3, pp. 579–597. [https://doi.org/10.1016/s0043-1354\(00\)00313-4](https://doi.org/10.1016/s0043-1354(00)00313-4)
3. Hayes E. T., Curran T. P., Dodd V. A. Odour and ammonia emissions from intensive pig units in Ireland. *Bioresource Technology*, 2006, vol. 97, no. 7, pp. 940–948. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.04.023>
4. Wasag H., Guz L., Sobczuk H., Czerwinski J., Kujawska J. Removal of methylamine from air by means of fibrous ion exchangers. *III Ogólnopolski Kongres Inżynierii Środowiska*, Lublin, 2009, vol. 59, no. 2, pp. 247–253.
5. Soldatov V. S., Kosandrovich E. G. Ion exchangers for air purification. *Ion exchange and solvent extraction, A series of advances*, 2011, vol. 20, pp. 45–115. <https://doi.org/10.1201/b10813-3>
6. Kosandrovich E. G. Sorption of ethylamines from air by fibrous ion exchangers. 1. FIBAN K-1, a strong acid cation exchanger. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemistry series*, 2014, no. 4, pp. 11–15 (in Russian).
7. Doroshkevich O. N., Kosandrovich E. G., Kashinsky A. V., Shachenkova L. N., Zelenkovsky V. M. Sorption of ethylamines from air by fibrous ion exchangers. 2. FIBAN K-4, a weak acid cation exchanger. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemistry series*, 2014, no. 4, pp. 16–20 (in Russian).
8. Soldatov V. S., Kosandrovich E. G. Chemical equilibria between the ion exchanger and gas phase. *Recent advances in Ion Exchange Theory and Practice*. Cambridge, 2008, pp. 103–110.
9. Soldatov V. S., Kosandrovich E. G. Theoretical description of sorption equilibrium in ion-gas systems. *Khimiya i tekhnologiya novykh veshchestv i materialov: sbornik nauchnykh trudov [Chemistry and technology of new substances and materials: collection of scientific papers]*. Minsk, 2008, pp. 206–228 (in Russian).
10. Moelwyn-Hughes E. A. *Physical Chemistry*. New York, 1957. 1295 p.
11. Siggia S., Hannah J. G. *Quantitative organic analysis via functional groups*. New York, 1954. 227 p.

Информация об авторах

Косандрович Евгений Генрихович – канд. хим. наук, доцент, вед. науч. сотрудник. Институт физико-органической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 13, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: kosandrovich@ifoch.bas-net.by.

Шаченкова Лариса Николаевна – канд. хим. наук, ст. науч. сотрудник. Институт физико-органической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 13, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: sln13102005@mail.ru.

Солдатов Владимир Сергеевич – академик, д-р хим. наук, профессор, гл. науч. сотрудник. Институт физико-органической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 13, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: soldatov@ifoch.bas-net.by.

Information about the authors

Kosandrovich Evgenii Genrikhovich – Ph. D. (Chemistry), Associate professor, Leading researcher. Institute Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (13, Sarganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kosandrovich@ifoch.bas-net.by.

Shachenkova Larisa Nikolaevna – Ph. D. (Chemistry), Senior researcher. Institute Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (13, Sarganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sln13102005@mail.ru.

Soldatov Vladimir Sergeevich – Academician, D. Sc. (Chemistry), Professor, Chief Researcher. Institute Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (13, Sarganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: soldatov@ifoch.bas-net.by.

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

УДК 539.23:547-304.4
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-2-169-174>

Поступило в редакцию 26.09.2018
Received 26.09.2018

**С. Н. Лемешонок, Ж. Д. Чапланова, академик В. Е. Агабеков,
Н. А. Иванова, И. Н. Кухто**

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

ФОТОИЗОМЕРИЗАЦИЯ И ФОТООРИЕНТАЦИЯ БРИЛЛИАНТОВОГО ЖЕЛТОГО В ТОНКОПЛЕНОЧНОМ СОСТОЯНИИ

Аннотация. Изучены особенности фотоизомеризации и фотоориентации азокрасителя бриллиантовый желтый (БЖ) в тонкопленочном состоянии. Установлено, что при облучении пленок БЖ полным светом лампы сверхвысокого давления ДРТ-1000 (УФ/ВИД-светом) протекает реакция транс-цис-изомеризации молекул красителя, которая описывается уравнением реакции первого порядка. Под действием линейно-поляризованного синего света ($\lambda = 457$ нм) в пленках на основе БЖ возникает оптическая анизотропия. Показано, что оптически анизотропные пленки БЖ с высоким значением дихроичного отношения (>10) формируются при использовании в качестве растворителей N-метилпирролидона и N,N-диметилформамида, а также ацетилцеллюлозы как полимерной матрицы.

Ключевые слова: транс-цис-изомеризация, фотоориентация, азокраситель, бриллиантовый желтый, тонкая пленка, фотооблучение, дихроизм поглощения

Для цитирования. Фотоизомеризация и фотоориентация бриллиантового желтого в тонкопленочном состоянии / С. Н. Лемешонок [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2019. – Т. 63, № 2. – С. 169–174. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-2-169-174>

**Sviatlana N. Lemiashonak, Zhanna D. Chaplanova, Academician Vladimir E. Agabekov,
Nadezhda A. Ivanova, Iryna N. Kukhta**

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

PHOTOISOMERIZATION AND PHOTOORIENTATION OF BRILLIANT YELLOW IN THE THIN FILM STATE

Abstract. The features of photoisomerization and photoorientation of azo dye brilliant yellow (BY) in the thin film state are studied. The trans-cis-isomerization of the dye molecules is established to proceed upon irradiation of the films based on BY with a full light of an ultra-high pressure lamp DRT-1000 (UV / VID light), this reaction is described by the first-order reaction equation. Under the action of linearly polarized blue light ($\lambda = 457$ nm), an optical anisotropy arises in films of BY. Optically anisotropic films of BY with a high dichroic ratio (>10) are shown to be formed using N-methylpyrrolidone and N,N-dimethylformamide as solvents and cellulose acetate as the polymer matrix.

Keywords: trans-cis-isomerization, photoorientation, azo dye, brilliant yellow, thin film, photoirradiation, absorption dichroism

For citation: Lemiashonak S. N., Chaplanova Zh. D., Agabekov V. E., Ivanova N. A., Kukhta I. N. Photoisomerization and photoorientation of brilliant yellow in the thin film state. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2019, vol. 63, no. 2, pp. 169–174 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-2-169-174>

Введение. Тонкопленочные материалы на основе азокрасителей и полимеров широко используются в технологии производства разнообразных поляризационно-оптических элементов и устройств [1; 2]. Несомненный интерес для получения фотоориентированных пленок с высоким параметром порядка представляет промышленный азокраситель бриллиантовый желтый (БЖ) – динатриевая соль 4,4'-бис(4-гидроксифенилазо)стильбен-2,2'-дисульфокислоты [3; 4]. Тонкопленочные покрытия на основе БЖ имеют высокую энергию сцепления с ЖК-материалами и микроскопическую однородность, что позволяет использовать их в качестве фотоориентантов при получении высококонтрастных ЖК-дисплеев [5]. Под действием линейно поляризованного света в пленках на основе БЖ возникает оптическая анизотропия. В литературе нет единого мнения относительно механизма фотоориентации БЖ в конденсированных средах. Так, в [3] высказано предположение, что молекулы БЖ в матрице триацетата целлюлозы ориентируются

в результате транс-цис-изомеризации. Однако согласно данным работ [4; 6] молекулы БЖ не изомеризуются при облучении как растворов, так и индивидуальных пленок красителя. По мнению авторов [7] изменения в спектрах поглощения пленок БЖ, экспонированных линейно поляризованным синим светом ($\lambda = 447$ нм, $I = 25$ мВт/см²), свидетельствуют о том, что молекулы БЖ претерпевают внутрислойное вращение во время процесса фотоориентации. В случае более высокоэнергетического ($\lambda = 365$ нм) поляризованного возбуждения для молекул БЖ предпочтительна ориентация вне плоскости, а релаксация энергии возбуждения молекул БЖ реализуется через вращательно-колебательные уровни без участия конформационных изменений [6].

Ранее [8; 9] мы показали, что природа полимерной матрицы и растворителей, из которых осаждены пленки, оказывают значительное влияние на морфологию и фотоориентацию тонких пленок на основе солей бисазопроизводных салициловой кислоты.

Цель работы – установить особенности фотоизомеризации и фотоориентации БЖ в индивидуальных тонких пленках и в полимерной матрице в зависимости от энергии возбуждающего света.

Материалы и методы исследования. Бриллиантовый желтый, ацетат целлюлозы (АЦ) (Sigma Aldrich) и N-метилпирролидон (НМП) (Merck) использовали без дополнительной очистки. N,N-диметилформамид (ДМФА) применяли свежеперегранным.

Тонкопленочные покрытия на основе БЖ получали методом центрифугирования. Растворы (~0,1 мл), содержащие 0,5–1,5 мас. % красителя в воде, ДМФА и НМП, наносили на стеклянные подложки и центрифугировали со скоростью 1800 об/мин в течение 60 с. Содержание АЦ в рабочих растворах варьировали от 0,5 до 5,0 мас. %. Пленки БЖ сушили в течение 10 мин при 100 °С на воздухе.

Толщину пленок оценивали по величине оптической плотности в соответствии с законом Бугера–Ламберта–Бера: $A = \varepsilon cd$, где A – оптическая плотность; ε – коэффициент молярного поглощения; c – концентрация красителя; d – толщина пленки. Предварительно было установлено, что оптическая плотность пленки линейно зависит от концентрации БЖ в исходных растворах в диапазоне 0,5–1,5 мас. % и концентрации АЦ 0,5–5,0 мас. %. При расчете толщины (d , нм) пленок, осажденных из растворов БЖ в НМП и ДМФА, принимали, что концентрация (c) красителя в них составляла 1,6 и 0,8 моль/кг в пленке, осажденной из 1,0 %-ного раствора БЖ в НМП, содержащего 1,0 мас. % АЦ. Значения молярного коэффициента поглощения БЖ ($\varepsilon_{\lambda_{\max}}$, л/моль · см) определяли из графика зависимости A от концентрации красителя в диапазоне $(1,0-30,5)10^{-6}$ моль/л (толщина кварцевой кюветы 1,0 см). Рассчитанные нами и приведенные в [7] значения толщины пленок, сформированных из растворов БЖ в ДМФА ([БЖ] = 1,5 мас. %), совпадают и составляют ≈ 30 нм.

Оптическую анизотропию пленок БЖ, облученных линейно поляризованным светом (синий светодиод с длиной волны излучения 457 нм и интенсивностью 30 мВт/см²), характеризовали величиной дихроичного отношения (ДО) $ДО = A_{\perp} / A_{\parallel}$ и параметром порядка (S) $S = (A_{\perp} - A_{\parallel}) / (A_{\perp} + 2A_{\parallel})$, где A_{\perp} и A_{\parallel} – поглощение линейно поляризованного зондирующего излучения в перпендикулярном (\perp) и параллельном (\parallel) направлениях относительно поляризации экспонирующего излучения.

При изучении фотоизомеризации красителя пленки облучали на воздухе светом полного спектрального диапазона (УФ/ВИД) и фильтрованным ($\lambda = 365$ нм) светом ртутной лампы сверхвысокого давления ДРТ-1000, а также неполяризованным синим светом ($\lambda = 457$ нм).

Изомеризацию БЖ исследовали с использованием пакета квантово-химических программ Gaussian 03 [10]. Проведена полная оптимизация геометрии для транс- и цис-изомера свободной молекулы БЖ в основном состоянии в рамках теории функционала плотности (DFT), функционал B3LYP, базисный набор 6–31G. Так как молекула БЖ имеет две N=N связи, рассмотрена возможность частичной и полной транс-цис-изомеризации.

Результаты и их обсуждение. Исходный БЖ относится к классу стильбеновых бисазокрасителей, содержит в своей структуре >C=C< и –N=N– связи, обладает развитой цепью сопряжения и способен существовать в изомерных транс- и цис-формах (схема). Как правило, в основном состоянии равновесие между транс- и цис-изомерами сдвинуто в сторону транс-изомера, занимающего меньший объем и поэтому более термодинамически стабильного. Согласно квантово-

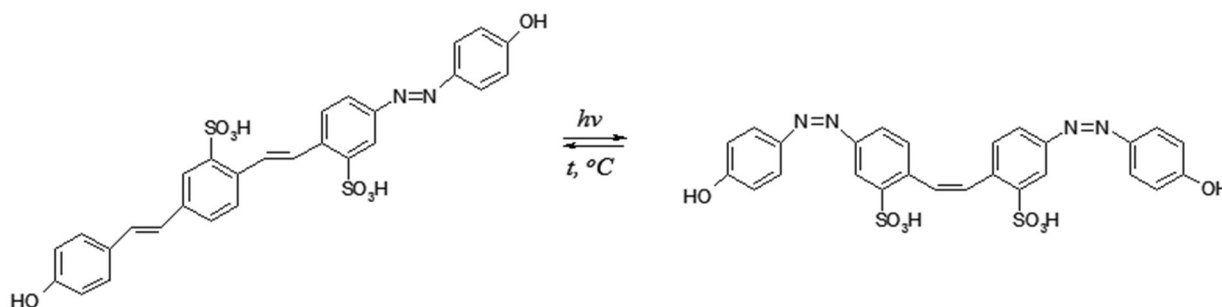


Схема транс-цис-изомеризации бриллиантового желтого

Scheme trans-cis-isomerization brilliant yellow

химическим расчетам (в предположении, что в изомеризации участвуют только азо-связи красителя [11]) разность полных энергий (ΔE) для цис- и транс-изомеров молекулы БЖ составила в случае частичной транс-цис-изомеризации 69,3 кДж/моль и полной – 139,3 кДж/моль.

Пленки БЖ, осажденные из раствора красителя в воде (БЖ/ H_2O), N,N-диметилформамиде (БЖ/ДМФА), N-метилпирролидоне (БЖ/НМП), чувствительны к облучению УФ/ВИД-светом, о чем свидетельствуют гипсохромный сдвиг λ_{max} и наличие изобестической точки в спектрах поглощения исследуемых образцов (рис. 1, a). В то же время в спектре поглощения пленки БЖ/НМП, облученной синим светодиодом ($\lambda = 457$ нм) (рис. 1, b), наблюдается только уменьшение величины оптической плотности при $\lambda_{max} = 406$ нм и отсутствуют признаки, характерные для реакции транс-цис-изомеризации красителя.

Способность молекул БЖ к образованию устойчивой цис-формы в пленках БЖ/ H_2O , БЖ/ДМФА и БЖ/НМП при облучении УФ/ВИД-светом может быть обусловлена значительным снижением скорости термической цис-транс-изомеризации в результате уменьшения молекулярной подвижности и возникающих в твердой фазе стерических ограничениях. В то же время для перехода молекулы красителя из транс- в цис-форму требуется наличие в образце свободного объема. В [3] установлено, что сформированные центрифугированием пленки БЖ/АЦ после нагрева при 60, 80 и 100 °С содержат соответственно 4,9, 5,0, и 4,2 мас. % НМП. Таким образом, примеси растворителей в пленках на основе БЖ могут выступать в роли пластификаторов и способствовать образованию свободного объема, необходимого для осуществления реакции транс-цис-изомеризации.

Кинетические кривые (рис. 2, a) изменения оптической плотности пленок БЖ при λ_{max} удовлетворительно спрямляются в координатах уравнения реакции 1-го порядка:

$$\ln \frac{A_0 - A_\infty}{A_t - A_\infty} = kt,$$

где k – эффективная константа скорости реакции; A_0 , A_t , A_∞ – оптические плотности пленок до облучения и за время облучения t и t_∞ соответственно.

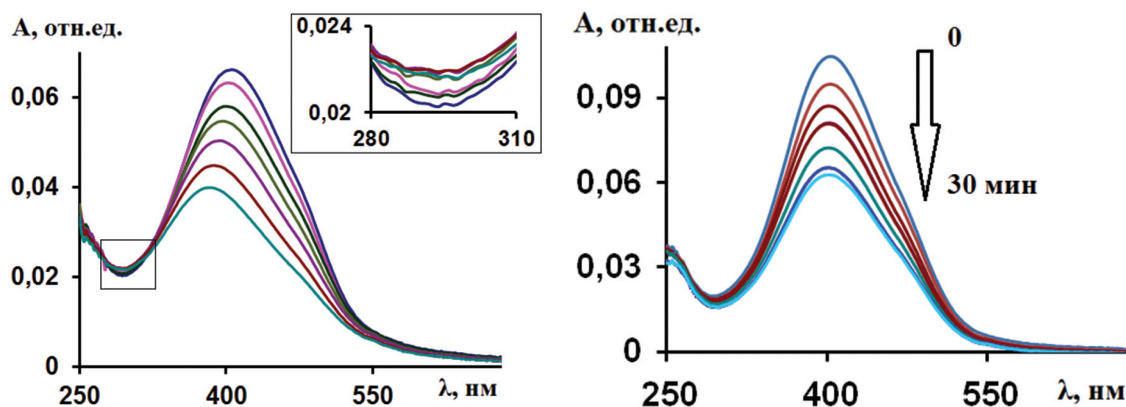


Рис. 1. Спектры поглощения пленок БЖ/НМП, облученных в течение 30 мин: a – УФ/ВИД-светом; b – синим светом
Fig. 1. Absorption spectra of brilliant yellow N-methylpyrrolidone films irradiated for 30 min: a – UV / VID light; b – blue light

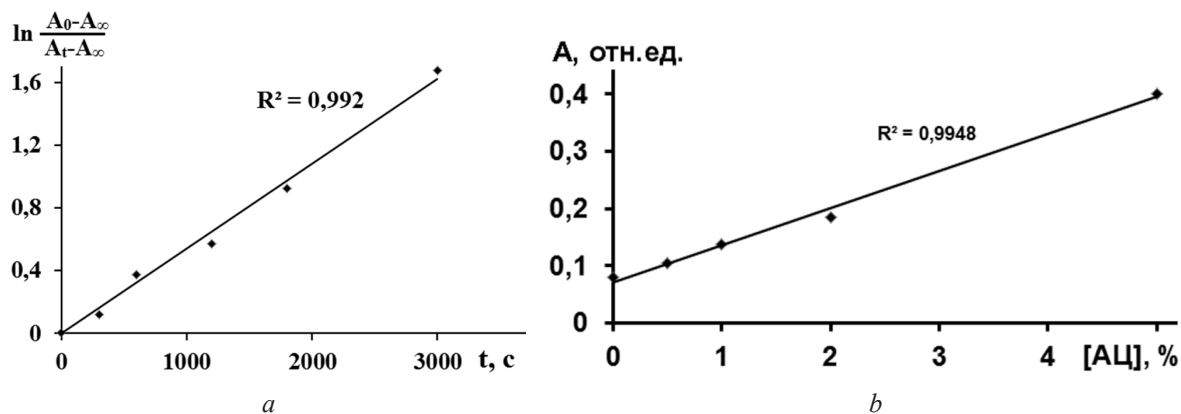


Рис. 2. Кинетическая кривая изменения оптической плотности пленки БЖ/НМП (а) и зависимость оптической плотности пленок БЖ/АЦ от концентрации полимера в исходных растворах (b)
 Fig. 2. Kinetic curve for the optical density of the brilliant yellow N-methylpyrrolidone film (a) and the dependence of the optical density of brilliant yellow-cellulose acetate films on the polymer concentration in the process feeds (b)

Значения k для пленок БЖ/Н₂O, БЖ/ДМФА и БЖ/НМП являются величинами одного порядка и равны $(3,1, 5,3 \text{ и } 5,4)10^{-4} \text{ с}^{-1}$ соответственно.

Ранее было показано [12], что введение БЖ в полимерную матрицу способствует формированию устойчивых к агрегированию оптически анизотропных пленок. Авторы [3] утверждают, что использование в качестве полимерной матрицы АЦ и увлажнение образца (относительная влажность 60 %, температура 40 °С) позволяют получать оптически анизотропные пленки с высоким параметром порядка $S \approx 0,81$.

В данной работе были получены композиционные пленки БЖ, диспергированного в матрице АЦ (БЖ/АЦ), из растворов, содержащих 1,5 мас. % красителя и различные концентрации полимера (0,5–5,0 мас. %). Оптическая плотность пленок БЖ/АЦ линейно зависит от концентрации полимера в исходных растворах (рис. 2, b). Таким образом, варьируя содержание полимера при одной и той же концентрации красителя, можно получать пленки БЖ с заданными оптическими свойствами.

В композиционных пленках БЖ/АЦ молекулы красителя претерпевают транс-цис-изомеризацию при облучении УФ/ВИД-светом (рис. 3, a) и не изомеризуются при воздействии неполяризованном синим светом. Эффективная константа скорости изомеризации БЖ при увеличении концентрации АЦ в исходных растворах от 0,5 до 5,0 мас. % незначительно изменяется от $5,3 \cdot 10^{-4}$ до $6,2 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$.

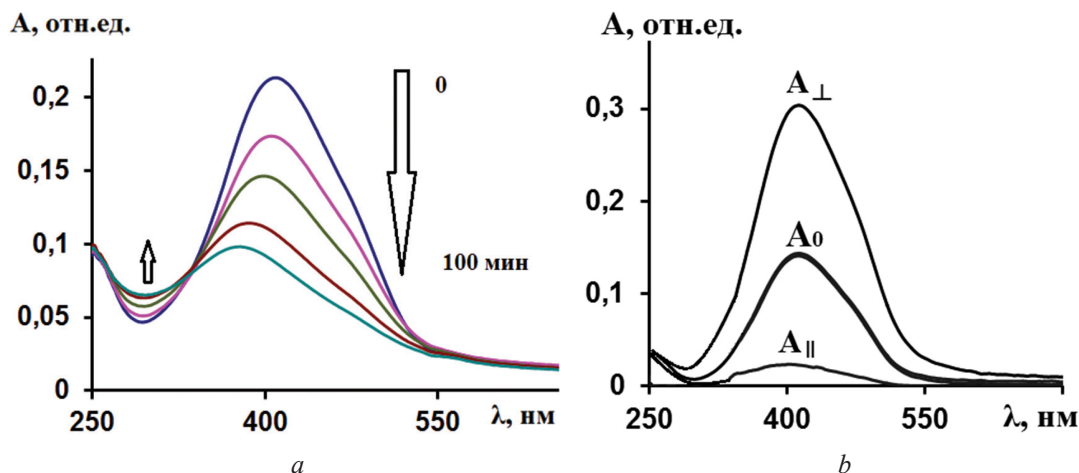


Рис. 3. Спектры поглощения пленок БЖ/АЦ, облученных в течение 100 мин УФ/ВИД-светом (а) и линейно поляризованным синим светом (b) до (A_0) и после (A_{\parallel} и A_{\perp}) облучения
 Fig. 3. Absorption spectra of the brilliant yellow/cellulose acetate films irradiated for 100 min by UV / VID light (a) and a linearly polarized blue light (b) before (A_0) and after (A_{\parallel} and A_{\perp}) irradiation

Под действием линейно поляризованного синего света в пленках БЖ возникает оптическая анизотропия (рис. 3, *b*), величина которой зависит от природы растворителей, используемых при формировании пленок БЖ. Молекулы красителя практически не ориентируются в пленках, сформированных из водного раствора БЖ: дихроичное отношение равно 1,3. Использование органических растворителей способствует фотоориентации БЖ: для пленок БЖ/ДМФА и БЖ/МП дихроичное отношение составляет 9,9 и 12,3 соответственно.

Способность к фотоориентации молекул красителя в композиционных пленках уменьшается при увеличении концентрации полимера в исходных растворах. При концентрации АЦ 1,0, 2,0 и 5,0 мас. % ДО составляет 13,8, 8,5 и 6,3 соответственно. При хранении образцов на воздухе ДО пленок практически не изменяется длительное время.

Заключение. В тонкопленочном состоянии молекулы БЖ претерпевают транс-цис-изомеризацию при облучении УФ/ВИД-светом и не изомеризуются при облучении неполяризованным синим светом. Под действием линейно поляризованного синего света в пленках БЖ возникает оптическая анизотропия. Использование в качестве растворителей для осаждения пленок БЖ N-метилпирролидона и N,N-диметилформамида способствует фотоориентации красителя: для пленок БЖ/ДМФА и БЖ/МП дихроичное отношение составляет 9,9 и 12,3 соответственно. Способность к фотоориентации молекул красителя в матрице ацетата целлюлозы уменьшается при увеличении концентрации полимера в исходных растворах.

Список использованных источников

1. Seiberle, H. Photo-aligned anisotropic optical thin films / H. Seiberle, C. Benecke, T. Bachelts // *J. of the SID*. – 2004. – Vol. 12, N 1. – P. 87–92. <https://doi.org/10.1889/1.1824791>
2. Electrically switchable photonic liquid crystal devices for routing of a polarized light wave / I. I. Rushnova [et al.] // *Optics Communications*. – 2018. – Vol. 413. – P. 179–183. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2017.12.029>
3. Photoalignment of an azobenzene-based chromonic liquid crystal dispersed in triacetyl cellulose: single-layer alignment films with an exceptionally high order parameter / M. Matsumori [et al.] // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. – 2015. – Vol. 7, N 21. – P. 11074–11078. <https://doi.org/10.1021/acsami.5b02577>
4. Photoisomerization in photoaligned azo dyes exhibiting photostability / G. Hegde [et al.] // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* – 2009. – Vol. 507, N 1. – P. 41–50. <https://doi.org/10.1080/15421400903048263>
5. Finnemeyer, V. Reactive mesogen stabilized azodye alignment for high contrast displays / V. Finnemeyer, D. Bryant, Ph. Bos. // *SID Digest*. – 2015. – Vol. 46, N 1. – P. 991–993. <https://doi.org/10.1002/sdtp.10319>
6. Photoalignment properties of brilliant yellow dye / O. Yaroshchuk [et al.] // *IDW'07 – Proceedings of the 14th International Display Workshops*. – 2007. – Vol. 3. – P. 1665–1668.
7. Effects of humidity and surface on photoalignment of brilliant yellow / J. Wang [et al.] // *Liq. Cryst.* – 2017. – Vol. 44, N 5. – P. 863–872. <https://doi.org/10.1080/02678292.2016.1247479>
8. Фотоиндуцированный дихроизм тонких пленок на основе бисазопроизводного салициловой кислоты и поливинилпирролидона / Ж. Д. Чапланова [и др.] // *Весті Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук*. – 2015. – № 3. – С. 45–50.
9. Кинетика и механизм фотоиндуцированной ориентации бисазодиоксидбензотиофена в тонких пленках / Ж. Д. Чапланова [и др.] // *Полимерные материалы и технологии*. – 2016. – № 4. – С. 39–45.
10. Gaussian 03, Revision D 01 / M. J. Frisch [et al.]. – Wallingford, 2004.
11. Inscoc, M. N. The relation between the absorption spectra and the chemical constitution of dyes / M. N. Inscoc, J. H. Gould, W. R. Brode // *J. Am. Chem. Soc.* – 1959. – Vol. 81, N 21. – P. 5634–5637. <https://doi.org/10.1021/ja01530a028>
12. Multi-layered anisotropic films based on the azo dye brilliant yellow and organic polymers / Zh. D. Chaplanova [et al.] // *JAS*. – 2013. – Vol. 80, N 5. – P. 658–662. <https://doi.org/10.1007/s10812-013-9823-3>

References

1. Seiberle H., Benecke C., Bachelts T. Photo-aligned anisotropic optical thin films. *Journal of the Society for Information Display*, 2004, vol. 12, no. 1, pp. 87–92. <https://doi.org/10.1889/1.1824791>
2. Rushnova I. I., Melnikova E. A., Tolstik A. L., Muravsky A. A. Electrically switchable photonic liquid crystal devices for routing of a polarized light wave. *Optics Communications*, 2018, vol. 413, pp. 179–183. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2017.12.029>
3. Matsumori M., Takahashi A., Tomioka Y., Hikima T., Takata M., Kajitani T., Fukushima T. Photoalignment of an azobenzene-based chromonic liquid crystal dispersed in triacetyl cellulose: single-layer alignment films with an exceptionally high order parameter. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2015, vol. 7, no. 21, pp. 11074–11078. <https://doi.org/10.1021/acsami.5b02577>
4. Hegde G., Kozenkov V. M., Chigrinov V. G., Kwok H. S. Photoisomerization in photoaligned azo dyes exhibiting photostability. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2009, vol. 507, no. 1, pp. 41–50. <https://doi.org/10.1080/15421400903048263>
5. Finnemeyer V., Bryant D., Bos Ph. Reactive mesogen stabilized azodye alignment for high contrast displays. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2015, vol. 46, no. 1, pp. 991–993. <https://doi.org/10.1002/sdtp.10319>

6. Yaroshchuk O., Gurumurthy H., Chigrinov V. G., Kwok H. S., Hasebe H., Takatsu H. Photoalignment properties of brilliant yellow dye. *IDW'07 – Proceedings of the 14th International Display Workshops*, 2007, vol. 3, pp. 1665–1668.

7. Wang J., McGinty C., West J., Bryant D., Finnemeyer V., Bryant D., Finnemeyer V., Reich R., Berry S., Clark H., Yaroshchuk O., Bos P. Effects of humidity and surface on photoalignment of brilliant yellow. *Liquid Crystals*, 2017, vol. 44, no. 5, pp. 863–872. <https://doi.org/10.1080/02678292.2016.1247479>

8. Chaplanova Zh. D., Muravsky A. A., Agabekov V. E., Gracheva E. A., Mikulich V. S., Larykava S. N. Photoinduced dichroism of thin films based on a salicylic acid bis-azo derivative and (poly)vinylpyrrolidone. *Vestsi Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2015, no. 3, pp. 45–50 (in Russian).

9. Chaplanova Zh. D., Larykava S. N., Agabekov V. E., Kukhta I. N. Kinetics and mechanism of photoinduced orientation of bisazodioksodibenzothiophene in thin films. *Polimernye materialy i tekhnologii = Polymer materials and technologies*, 2016, no. 4, pp. 39–45 (in Russian).

10. Frisch M. J., Trucks G. W., Schlegel H. B., Scuseria G. E., Robb M. A., Cheeseman J. R. [et al.]. *Gaussian 03, Revision D 01*. Wallingford, 2004.

11. Inscoe M. N., Gould J. H., Brode W. R. The relation between the absorption spectra and the chemical constitution of dyes. *Journal of the American Chemical Society*, 1959, vol. 81, no. 21, pp. 5634–5637. <https://doi.org/10.1021/ja01530a028>

12. Chaplanova Zh. D., Murauski A. A., Rogachev A. A., Agabekov V. E., Gracheva E. A. Multi-layered anisotropic films based on the azo dye brilliant yellow and organic polymers. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2013, vol. 80, no. 5, pp. 658–662. <https://doi.org/10.1007/s10812-013-9823-3>

Информация об авторах

Лемешонек Светлана Николаевна – мл. науч. сотрудник. Институт химии новых материалов НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 36, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: larikova.svetlana@gmail.com.

Чапланова Жанна Давидовна – канд. хим. наук, вед. науч. сотрудник. Институт химии новых материалов НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 36, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: chaplanova_zhanna@mail.ru.

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

Иванова Надежда Аркадьевна – канд. хим. наук, заведующая лабораторией. Институт химии новых материалов НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 36, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: nadezh_iva@mail.ru.

Кухто Ирина Николаевна – науч. сотрудник. Институт химии новых материалов НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 36, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: iryana.kukhta@tut.by.

Information about the authors

Lemiashonak Sviatlana Nikolaevna – Junior researcher. Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Sciences of Belarus (36, F. Skoryna Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: larikova.svetlana@gmail.com.

Chaplanova Zhanna Davidovna – Ph. D. (Chemistry), Leading researcher. Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Sciences of Belarus (36, F. Skoryna Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: chaplanova_zhanna@mail.ru.

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

Ivanova Nadezhda Arkadievna – Ph. D. (Chemistry), Head of the Laboratory. Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Sciences of Belarus (36, F. Skoryna Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nadezh_iva@mail.ru.

Kukhta Iryna Nikolaevna – Researcher. Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Sciences of Belarus (36, F. Skoryna Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: iryana.kukhta@tut.by.

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

БИОЛОГИЯ
BIOLOGY

УДК 579.8:632.3+632.4+632.7
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-2-175-180>

Поступило в редакцию 02.08.2018
Received 02.08.2018

**С. В. Пантелеев¹, О. Ю. Баранов¹, Л. А. Головченко², А. В. Константинов¹,
Л. В. Можаровская¹, Н. Г. Дишук², В. А. Тимофеева²,
член-корреспондент В. Е. Падутов¹**

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

²*Центральный ботанический сад Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь*

**ИЗУЧЕНИЕ ВИДОВОГО СОСТАВА МИКРОБИОМА ФИТОФАГОВ
ЦВЕТОЧНЫХ РАСТЕНИЙ НА ОСНОВАНИИ ДАННЫХ
ДНК-ШТРИХКОДИРОВАНИЯ**

Аннотация. С использованием метода баркодирования ДНК проведена молекулярно-генетическая идентификация доминирующего видового состава микробиома фитофагов многолетних цветочных растений. Выявлены различные варианты видовых сочетаний в системе «микробиота–фитофаг», а также изучены способы переноса фитофагами патогенной микрофлоры.

Ключевые слова: ДНК, ДНК-штрихкодирование, ген, полимеразная цепная реакция, секвенирование, фитопатоген, фитофаг, микробиом, многолетние цветочные растения

Для цитирования. Изучение видового состава микробиома фитофагов цветочных растений на основании данных ДНК-штрихкодирования / С. В. Пантелеев [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2019. – Т. 63, № 2. – С. 175–180. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-2-175-180>

**Stanislav V. Panteleev¹, Oleg Yu. Baranov¹, Ludmila A. Golovchenko², Andrei V. Konstantinov¹,
Ludmila V. Mozharovskaya¹, Natalia G. Dishuk², Veronika A. Timofeeva²,
Corresponding Member Vladimir E. Padutov¹**

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

²*Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

**STUDY OF THE MICROBIOME SPECIES OF THE FLOWERS PHYTOPHAGES
BASED ON THE DNA-BARCODING DATA**

Abstract. Based on the DNA-barcoding data, a molecular-genetic identification of the dominant microbiome species composition of the perennial floral plants phytophages was carried out. Various variants of species combinations in the microbiota–phytophagous system, as well as the ways of phytophagous transmission of pathogenic microflora have been identified.

Keywords: DNA, DNA-barcoding, gene, polymerase chain reaction, sequencing, phytopathogen, phytophage, microbiome, perennial flowers

For citation: Panteleev S. V., Baranov O. Yu., Golovchenko L. A., Konstantinov A. V., Mozharovskaya L. V., Dishuk N. G., Timofeeva V. A., Padutov V. E. Study of the microbiome species of the flowers phytophages based on the DNA-barcoding data. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2019, vol. 63, no. 2, pp. 175–180 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-2-175-180>

Введение. Промышленному цветоводству в Беларуси придается важное хозяйственное значение. Широкий перечень сортового посадочного материала для озеленения выращивается значительным числом специализированных государственных предприятий и частных питомников. В то же время основными держателями коллекционного фонда многолетних цветочных растений остаются ботанические сады. Например, только коллекционный фонд цветочно-декоративных

растений открытого грунта Центрального ботанического сада НАН Беларуси насчитывает свыше пяти тысяч видов, форм и сортов и ежегодно пополняется [1].

Необходимым условием выращивания цветочных растений является не только учет их биологических особенностей и соблюдение агротехники возделывания, но и организация эффективной системы выявления и мониторинга вредных организмов. В ходе проведенного на территории страны многолетнего фитопатологического обследования различных объектов цветоводства определен перечень наиболее значимых видов вредителей и возбудителей инфекционных заболеваний растений (включая инвазивные виды), наносящих существенный ущерб цветоводческому хозяйству. Кроме того, также проведена работа и по совершенствованию способов диагностики вредных организмов цветочных растений за счет интегрирования в систему фитопатологического мониторинга современных методов ДНК-маркирования.

ДНК-технологии представляют собой высокоинформативный инструмент для проведения идентификации вредителей и инфекций, что связано с их высокими аналитическими характеристиками применительно к изучению различных типов биологических систем. Например, в настоящий момент ДНК-штрихкодирование (ДНК-баркодинг) среди таксономических методов представляет собой «золотой стандарт» молекулярной идентификации, позволяющий с высокой точностью определять принадлежность организма к той или иной систематической группе [2; 3]. Особую актуальность применение технологий ДНК-идентификации представляет в случаях низкой эффективности использования морфологических маркеров: при анализе фенотипически сходных организмов (криптические виды, виды-двойники и др.), инвазивных видов, гетероморфных и полиморфных таксонов, деградированного биологического материала, фрагментов органов и тканей, спор, личиночных стадий беспозвоночных и др. [3]; а также для проведения комплексного анализа фитофагов, вредоносность которых обусловлена не только прямым механическим повреждением растений, но и способностью выступать в качестве основного вектора распространения различных трансмиссивных заболеваний [4].

Исходя из всего выше сказанного, целью данной работы являлось определение доминирующего видового состава микробиома фитофагов многолетних цветочных растений на основании данных ДНК-штрихкодирования, что позволит установить спектр инфекционных заболеваний, распространяемых посредством вредителей.

Материалы и методы исследования. Материалом для исследования служили цветочные растения с симптомами повреждения вредителями. Экспериментальный материал был собран в городских насаждениях республики, в коллекционных фондах растений ЦБС НАН Беларуси, в торговой сети Минска и Гомеля. В ходе предварительного анализа образцов цветочных растений, относящихся к 27 родам, наличие фитофагов было диагностировано только для девяти: Каланхоэ, Хризантема, Гербера, Гладиолус, Флокс, Сурфиния, Петуния, Астра, Антуриум. В целом для проведения молекулярно-генетической идентификации был отобран биологический материал 53 фитофагов из классов насекомых и паукообразных.

Молекулярно-генетическое исследование фитофагов производилось по оригинальной методике [5]. В качестве диагностических маркеров были использованы мтCOI и мт16S рРНК (насекомые и паукообразные) [6; 7]; ITS1, 5,8S рРНК, ITS2 (микромикеты) [8; 9]; 23S рРНК (бактерии) [10]. Диагностика видового состава микробиоты осуществлялась по двум отдельным направлениям: анализ наружных покровов фитофагов и изучение внутренних органов, включая содержимое пищеварительного тракта. В ряде случаев для диагностики следовых количеств микромикетов применялась гнездовая ПЦР [8; 9]. ДНК-штрихкодирование осуществлялось на базе генетического анализатора ABI Prism 310 (Thermo Fisher Scientific, США). Видовая идентификация выполнялась на основе сравнения с референсными депонентами базы данных GenBank NCBI [11].

Результаты и их обсуждение. Анализ результатов молекулярно-генетической идентификации фитофагов показал, что выявленные на цветочных растениях особи принадлежат к 10 видам беспозвоночных животных (таблица): трипсы – *Hercinothrips femoralis*, *Frankliniella occidentalis*, *Parthenothrips dracaenae*, *Thrips tabaci*; совки (личиночная стадия) – *Heliothis* sp.; шведская муха – *Oscinella* sp. nov. (вид отсутствует в базе данных NCBI); паутиный клещ – *Tetranychus urticae*; корневой клещ – *Rhizoglyphus robini*; тепличная белокрылка – *Trialeurodes vaporariorum*; посев-

ной щелкун (личиночная стадия) – *Agriotes lineatus*. Как следует из таблицы, наибольшим кругом хозяев характеризовались трипсы *H. femoralis*, в то же время остальные виды беспозвоночных были приурочены к определенным родам растений. Также следует отметить, что обнаруженный в посадочном материале антуриума (источник: коммерческий питомник) вид трипсов *F. occidentalis* является инвазивным в Европе и карантинным на территории Республики Беларусь.

Доминирующий видовой состав микробиома фитофагов многолетних цветочных растений
Dominant microbiome species composition of the perennial floral plants phytophages

Наименование фитофага (растение-хозяин) Phytophage name (plant-host)	Внешние покровы (микобиота/бактериобиота) Outer envelopes (microbiota/bacteriobiota)	Внутренние полости тела (микобиота/бактериобиота) Inner cavities of a body (microbiota/bacteriobiota)
<i>Hercinothrips femoralis</i> Reuter (Каланхоэ, Герберы, Гладиолус, Сурфиния, Петуния, Антуриум)	–	<i>Cladosporium</i> sp. (<i>C. cladosporioides</i> complex)
	<i>Acinetobacter</i> spp.	<i>Wolbachia</i> sp. 1
<i>Frankliniella occidentalis</i> Pergande (эндемичный для Сербии генотип) (Антуриум)	<i>Fusarium</i> sp. isolate FEB57A <i>Phoma</i> sp. (<i>Didymella</i> sp.) <i>Uncultured Cladosporium</i>	<i>Meyerozyma guilliermondii</i> (Wickerham) Kurtzman et Suzuki
	<i>Klebsiella</i> sp.	<i>Enterobacteriaceae</i> sp.
<i>Frankliniella occidentalis</i> Pergande (Антуриум)	–	<i>Talaromyces amestolkae</i> Yilmaz et al. <i>Gloeophyllum sepiarium</i> (Wulfen) P.Karst.
	<i>Acinetobacter</i> spp.	<i>Erwinia</i> sp.nov
<i>Parthenothrips dracaenae</i> Heeger (Антуриум)	<i>Fomitopsis pinicola</i> (Sw.) P.Karst.	<i>Lentinus tigrinus</i> (Bull.) Fr.
	<i>Acinetobacter</i> sp.	<i>Wolbachia</i> sp. 1
<i>Thrips tabaci</i> Lindeman (Гладиолус, Астра)	–	<i>Meyerozyma guilliermondii</i> (Wickerham) Kurtzman et Suzuki
	<i>Acinetobacter</i> spp.	<i>Wolbachia</i> sp. 1
<i>Tetranychus urticae</i> Koch. (Хризантема)	<i>Uncultured fungus</i> clone ZBJ201307-11	<i>Cladosporium</i> spp. (<i>C. cladosporioides</i> complex) <i>Alternaria alternata</i> (Fr.) Keissl. <i>Uncultured Clitopilus</i>
	<i>Acinetobacter</i> spp.	<i>Wolbachia</i> sp. 2
<i>Rhizoglyphus robini</i> Claparede (Гладиолус)	<i>Penicillium</i> sp.	<i>Penicillium</i> sp. <i>Didymella glomerata</i> (Corda) Q. Chen & L. Cai <i>Phoma herbarum</i> Westend. <i>Russulaceae</i> sp. <i>Clitopilus cf. scyphoides</i> (Fr.) Singer
	<i>Acinetobacter</i> sp.	<i>Rubrobacter</i> sp.
<i>Trialeurodes vaporariorum</i> Westwood (Антуриум)	–	<i>Meyerozyma guilliermondii</i> (Wickerham) Kurtzman et Suzuki
	<i>Acinetobacter</i> spp.	<i>Arsenophonus</i> sp.
<i>Oscinella</i> sp. (Флокс)	<i>Alternaria infectoria</i> E. G. Simmons	<i>Alternaria infectoria</i> E.G. Simmons
	<i>Acinetobacter</i> sp.	<i>Pantoea ananatis</i> (Serrano) Mergaert et al.
<i>Heliothis</i> sp. (Флокс)	–	<i>Alternaria alternata</i> (Fr.) Keissl. <i>Metschnikowia</i> sp.
	<i>Acinetobacter</i> sp.	<i>Ralstonia pickettii</i> complex
<i>Agriotes lineatus</i> L. (Гладиолус)	–	<i>Fusarium oxysporum</i> Schldt.
	<i>Acinetobacter</i> sp.	<i>Acinetobacter calcoaceticus</i> / <i>baumannii</i> complex <i>Serratia plymuthica</i> (Dyar) Bergy et al. <i>Serratia liquefaciens</i> (Grimes, Hennerty) Bascomb et al.

В ходе молекулярно-генетического анализа микробиома фитофагов было установлено, что значительная часть всей грибной и бактериальной флоры была локализована в пищеварительном тракте у большинства исследованных особей. На покровах фитофагов содержание биологического материала микроорганизмов было, как правило, на порядок меньше – детекция диагностических локусов методом одностадийной ПЦР была возможна лишь для бактериальных организмов, в то время как продукты амплификации грибной ДНК визуализировались лишь в случае использования метода гнездовой (двустадийной) ПЦР.

Результаты видовой идентификации грибной и бактериальной микрофлоры исследуемых фитофагов по данным секвенирования представлены в таблице.

Как следует из таблицы, фитофаги цветочных растений выступают в качестве векторов распространения широкого спектра патогенных прокариотических и эукариотических микроорганизмов. Так, было установлено, что трипсы *F. occidentalis*, корневые клещи *R. robini* и шведские мухи *Oscinella* sp. на покровах наружных органов содержали биологический материал фитопатогенных грибов из родов *Fusarium*, *Phoma*, *Cladosporium*, *Penicillium* и *Alternaria*. В пищеварительной системе, кроме указанных родов микромицетов, также выявлены представители *Talaromyces* и *Didymella*. Кроме того, у трипсов *P. dracaenae* и *F. occidentalis* также обнаружен генетический материал дереворазрушающих грибов: *Fomitopsis pinicola* и *Lentinus tigrinus* и *Gloeophyllum sepiarium* соответственно. В пищеварительной системе корневого клеща *Rhizoglyphus robini* идентифицированы эктомикоризные грибы *Russulaceae* sp. и *Clitopilus* spp. На покровах тела обыкновенного паутиного клеща обнаружен некультивируемый гриб *Uncultured fungus* clone ZBJ201307-11, описанный П. Дю с соавт. при исследовании микробиома дождевой воды [11]. Также, в экскрементах трипсов было установлено наличие дрожжевого гриба *Filobasidium magnum*, являющегося распространенным эндофитом растений. Кроме фитопатогенных микромицетов в пищеварительной системе *Thrips tabaci* идентифицированы дрожжеподобные и дрожжевые симбионты многих беспозвоночных животных – *Meyerozyma guilliermondii* и *Metschnikowia* sp.

Проведенный анализ видового состава бактериобиоты показал, что практически в половине случаев во внутренних частях тела исследованных вредителей доминировали представители родов *Wolbachia* и *Arsenophonus* – облигатные внутриклеточные симбионты членистоногих. Среди облигатных и оппортунистических растительных инфекций были выявлены *Pantoea ananatis*, *Erwinia* sp. nov., *Klebsiella* sp., а также представитель неизвестного рода бактерий порядка *Enterobacteriaceae*, близкородственный *Pluralibacter*, *Klebsiella* и *Enterobacter*. Оставшаяся часть микробиома включала в себя различные виды непатогенных бактерий, ассоциированных с растениями, насекомыми или почвенной микробиотой.

Заключение. Проведенный анализ доминирующего видового состава микробиома фитофагов позволил выявить неспецифический характер ассоциаций между беспозвоночными животными и диагностируемыми таксонами патогенных микроорганизмов. В то же время в ряде случаев прослеживается органотропная (по отношению к растениям-хозяевам) специализация системы «фитофаг–фитопатоген». В целом отмечено, что большая часть инфекций цветочных растений, переносимых членистоногими, представлена широкоспециализированными видами некротрофных грибов и распространяется через механические повреждения вегетативных и генеративных органов, вызываемых фитофагами. Таким образом, полученные данные указывают на необходимость проведения комплексного мониторинга фитосанитарного состояния объектов озеленения, учитывающего не только анализ перечня диагностируемых болезней, но и комплекс вредителей, являющихся потенциальным вектором распространения широкого спектра облигатных и факультативных патогенов растений.

Список использованных источников

1. Титок, В. В. Генофонд орнаментальных растений Центрального ботанического сада НАН Беларуси: современное состояние и перспективы устойчивого развития / В. В. Титок, И. К. Володько, Н. Л. Белоусова // Цветоводство: история, теория, практика: матер. VII междунар. науч. конф. – Минск, 2016. – С. 390–392.
2. Ten species in one: DNA barcoding reveals cryptic species in the neotropical skipper butterfly *Astraptes fulgerator* / P. Hebert [et al.] // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. – 2004. – Vol. 101, N 41. – P. 14812–14817. <https://doi.org/10.1073/pnas.0406166101>
3. Taylor, H. R. An emergent science on the brink of irrelevance: a review of the past 8 years of DNA barcoding / H. R. Taylor, W. E. Harris // Molecular Ecology Resources. – 2012. – Vol. 12, N 3. – P. 377–388. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0998.2012.03119.x>
4. Perilla-Henao, L. M. Vector-Borne Bacterial Plant Pathogens: Interactions with Hemipteran Insects and Plants / L. M. Perilla-Henao, C. L. Casteel // Front. Plant Sci. – 2016. – Vol. 7. – P. 1–15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01163>
5. Пантелеев, С. В. Оценка роли насекомых в распространении возбудителей кладоспориоза и альтернариоза в лесных питомниках на основании использования методов ДНК-анализа / С. В. Пантелеев // Тр. БГТУ. Лесное хозяйство. – 2012. – № 1 (148). – С. 253–257.

6. DNA primers for amplification of mitochondrial cytochrome c oxidase I from diverse metazoan invertebrates / O. Folmer [et al.] // *Mol. Marine Biol. Biotechnol.* – 1994. – Vol. 3. – P. 294–299.
7. Evolution, weighting and phylogenetic utility of mitochondrial gene sequences and a compilation of conserved polymerase chain reaction primers / C. Simon [et al.] // *Ann. Entomol. Soc. Amer.* – 1994. – Vol. 87, N 6. – P. 651–701. <https://doi.org/10.1093/aesa/87.6.651>
8. Gardes, M. ITS primers with enhanced specificity for basidiomycetes application of the identification of mycorrhizae and rusts / M. Gardes, T. D. Bruns // *Mol. Ecol.* – 1993. – Vol. 2, N 2. – P. 113–118. <https://doi.org/10.1111/j.1365-294x.1993.tb00005.x>
9. Amplification and direct sequencing of fungal ribosomal RNA genes for phylogenetics / T. White [et al.] // *PCR protocols: a guide to methods and applications.* – 1990. – P. 315–322.
10. Anthony, R. M. Rapid diagnosis of bacteremia by universal amplification of 23S ribosomal DNA followed by hybridization to an oligonucleotide array / R. M. Anthony, T. J. Brown, G. L. French // *J. Clin. Microbiol.* – 2000. – Vol. 38, N 2. – P. 781–788.
11. National Center for Biotechnological Information, NCBI [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/>. – Date of access: 24.05.2018.

References

1. Titok V. V., Volod'ko I. K., Belousova N. L. Genofond of ornamental plants of the Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus: current status and perspectives of sustainable development. *Tsvetovodstvo: istoriya, teoriya, praktika: materialy VII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii [Floriculture: history, theory, practice: proceedings VII International Conference]*. Minsk, 2016, pp. 390–392 (in Russian).
2. Hebert P., Penton E., Burns J., Janzen D., Hallwachs W. Ten species in one: DNA barcoding reveals cryptic species in the neotropical skipper butterfly *Astraptes fulgerator*. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, vol. 101, no. 41, pp. 14812–14817. <https://doi.org/10.1073/pnas.0406166101>
3. Taylor H. R., Harris W. E. An emergent science on the brink of irrelevance: a review of the past 8 years of DNA barcoding. *Molecular Ecology Resources*, 2012, vol. 12, no. 3, pp. 377–388. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0998.2012.03119.x>
4. Perilla-Henao L. M., Casteel C. L. Vector-Borne Bacterial Plant Pathogens: Interactions with Hemipteran Insects and Plants. *Frontiers in Plant Science*, 2016, vol. 7, pp. 1–15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01163>
5. Panteleyev S. V. Assessment of the role of insects in the propagation of causative agents of cladosporiosis and alternaria in forest nurseries, based on the use of DNA analysis methods. *Trudy BGTU [Proceedings of the BSTU]*, 2012, no. 1(148), pp. 253–257 (in Russian).
6. Folmer O., Black M., Hoeh W, Lutz R., Vrijenhoek R. DNA primers for amplification of mitochondrial cytochrome c oxidase I from diverse metazoan invertebrates. *Molecular Marine Biology and Biotechnology*, 1994, vol. 3, pp. 294–299.
7. Simon C., Frati F., Beckenbach A., Crespi B., Liu H., Flook P. Evolution, weighting, and phylogenetic utility of mitochondrial gene sequences and a compilation of conserved polymerase chain reaction primers. *Annals of the Entomological Society of America*, 1994, vol. 87, no. 6, pp. 651–701. <https://doi.org/10.1093/aesa/87.6.651>
8. Gardes M., Bruns T. D. ITS primers with enhanced specificity for basidiomycetes application of the identification of mycorrhizae and rusts. *Molecular Ecology*, 1993, vol. 2, no. 2, pp. 113–118. <https://doi.org/10.1111/j.1365-294x.1993.tb00005.x>
9. White T. J., Bruns T., Lee S., Taylor J. Amplification and direct sequencing of fungal ribosomal RNA genes for phylogenetics. *PCR protocols: a guide to methods and applications*, 1990, pp. 315–322.
10. Anthony R. M., Brown T. J., French G. L. Rapid diagnosis of bacteremia by universal amplification of 23S ribosomal DNA followed by hybridization to an oligonucleotide array. *Journal of Clinical Microbiology*, 2000, vol. 38, no. 2, pp. 781–788.
11. National Center for Biotechnological Information, NCBI. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/> (accessed 24 May 2018).

Информация об авторах

Пантелеев Станислав Викторович – канд. биол. наук, ст. науч. сотрудник. Институт леса НАН Беларуси (ул. Пролетарская, 71, 246050, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: stasikdesu@mail.ru.

Баранов Олег Юрьевич – д-р биол. наук, доцент, заведующий сектором. Институт леса НАН Беларуси (ул. Пролетарская, 71, 246050, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: betula-belarus@mail.ru.

Головченко Людмила Анатольевна – канд. биол. наук, заведующий лабораторией. Центральный ботанический сад НАН Беларуси (ул. Сурганова, 2в, 220050, Минск, Республика Беларусь). E-mail: L.Golovchenko@cbg.org.by.

Константинов Андрей Вячеславович – науч. сотрудник. Институт леса НАН Беларуси (ул. Пролетарская, 71, 246001, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: avkonstantinof@mail.ru.

Information about the authors

Pantelev Stanislav Victorovich – Ph. D. (Biology), Senior researcher. Forest Research Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (71, Proletarskaya Str., 246050, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: stasikdesu@mail.ru.

Baranov Oleg Yur'evich – D. Sc. (Biology), Assistant professor, Head of the Department. Forest Research Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (71, Proletarskaya Str., 246050, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: betula-belarus@mail.ru.

Golovchenko Ludmila Anatol'evna – Ph. D. (Biology), Head of the Laboratory. Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus (2v, Surganov Str., 220050, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: L.Golovchenko@cbg.org.by.

Konstantinov Andrei Vyacheslavovich – Researcher. Forest Research Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (71, Proletarskaya Str., 246050, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: avkonstantinof@mail.ru.

Можаровская Людмила Валентиновна – мл. науч. сотрудник. Институт леса НАН Беларуси (ул. Пролетарская, 71, 246050, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: milamozh@yandex.ru.

Дишук Наталья Георгиевна – канд. биол. наук, вед. науч. сотрудник. Центральный ботанический сад НАН Беларуси (ул. Сурганова, 2в, 220050, Минск, Республика Беларусь). E-mail: dishukn@rambler.ru.

Тимофеева Вероника Алексеевна – канд. с.-х. наук, вед. науч. сотрудник. Центральный ботанический сад НАН Беларуси (ул. Сурганова, 2в, 220050, Минск, Республика Беларусь). E-mail: v.a.timofeeva@mail.ru.

Падутов Владимир Евгеньевич – член-корреспондент, д-р биол. наук, заведующий лабораторией. Институт леса НАН Беларуси (ул. Пролетарская, 71, 246050, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: forestgen@mail.ru.

Mozharovskaya Ludmila Valentinovna – Junior researcher. Forest Research Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (71, Proletarskaya Str., 246050, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: milamozh@yandex.ru.

Dishuk Natalia Georgievna – Ph. D. (Biology), Leading researcher. Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus (2в, Surganov Str., 220050, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dishukn@rambler.ru.

Timofeeva Veronika Alekseevna – Ph. D. (Agriculture), Leading researcher. Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus (2в, Surganov Str., 220050, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: v.a.timofeeva@mail.ru.

Padutov Vladimir Evgenievich – Corresponding Member, D. Sc. (Biology), Head of the Laboratory. Forest Research Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (71, Proletarskaya Str., 246050, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: forestgen@mail.ru.

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

УДК 577.1+579.2+579.8

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-2-181-188>

Поступило в редакцию 14.09.2018

Received 14.09.2018

Л. И. Сапунова¹, академик А. Г. Лобанок¹, К. К. Яцевич², С. А. Кулиш¹,
И. О. Тамкович¹, Л. В. Ерхова¹, Е. Н. Сысолятин²

¹Институт микробиологии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

²Институт генетики и цитологии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

ВЫДЕЛЕНИЕ, ХАРАКТЕРИСТИКА И МОЛЕКУЛЯРНО-ГЕНЕТИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ НОВОГО ШТАММА БАКТЕРИЙ *PAENIBACILLUS SPECIES*

Аннотация. Из зерна пшеницы, контаминированного образующей полисахарид микрофлорой, выделена и охарактеризована культура бактерий ПС-К-17. Установлено, что изолят на агаризованных средах и в глубинной культуре со специфическими субстратами синтезирует бета-галактозидазу, амилазу, протеазу, пектиназу, целлюлазу, бета-глюконазу, липазу (эстеразу), альгиназу, а также внеклеточные полисахариды и пигменты, возможно, каротиноиды. На основании культурально-морфологических и физиолого-биохимических особенностей, а также филогенетического анализа нуклеотидных последовательностей гена 16S рРНК (код доступа MF443394 в GenBank) бактериальная культура идентифицирована как *Paenibacillus species* ПС-К-17. Исследуемый изолят образует одну филогенетическую ветвь с типовыми штаммами *Paenibacillus nicotianae* (98,3 %), *Paenibacillus hordei* (98,2 %), *Paenibacillus kyungheensis* (97,9 %), в пределах которой занимает обособленное положение. Штамм *Paenibacillus sp.* ПС-К-17 может найти применение в биотехнологии как продуцент внеклеточных полисахаридов и ферментов, расщепляющих растительные полимеры, а также как компонент микробного консорциума в составе новой кормовой добавки комплексного действия.

Ключевые слова: бактерии, выделение, внеклеточные ферменты, полисахариды, биосинтез, физиолого-биохимические особенности, нуклеотидные последовательности, ген 16S рРНК, идентификация, *Paenibacillus species*

Для цитирования: Выделение, характеристика и молекулярно-генетическая идентификация нового штамма бактерий *Paenibacillus species* / Л. И. Сапунова [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2019. – Т. 63, № 2. – С. 181–188. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-2-181-188>

Leanida I. Sapunova¹, Academician Anatoli G. Lobanok¹, Kanstantsyia K. Yatsevich², Sviatlana A. Kulish¹,
Iryna A. Tamkovich¹, Liudmila V. Yarkhova¹, Yaugen M. Sysaliatsin²

¹Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

²Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

SCREENING, CHARACTERIZATION AND MOLECULAR-GENETIC IDENTIFICATION OF A NEW BACTERIAL STRAIN *PAENIBACILLUS SPECIES*

Abstract. Bacterial variant PS-K-17 was isolated from wheat grain contaminated by polysaccharide-producing microbiota for further characterization. It was found that the isolate grown on agar slants and in submerged culture on media with specific substrates synthesized beta-galactosidase, amylase, protease, pectinase, cellulase, beta-glucanase, lipase (esterase), alginase, extracellular polysaccharides, and pigments, probably carotenoids. Based on cultural-morphological and physiological-biochemical properties and phylogenetic analysis of nucleotide sequences of 16S rRNA gene (access code MF443394 in GenBank) the bacterial culture was identified as *Paenibacillus species* PS-K-17. The studied isolate forms one phylogenetic branch with type strains *Paenibacillus nicotianae* (98.3 %), *Paenibacillus hordei* (98.2 %), *Paenibacillus kyungheensis* (97.9 %), holding wherein a separate position. Strain *Paenibacillus sp.* PS-K-17 may find use in biotechnology as a producer of extracellular polysaccharides and enzymes splitting plant polymeric substances as well as a component of microbial consortium-ingredient of a new complex feed additive.

Keywords: bacteria, screening, extracellular enzymes, polysaccharides, biosynthesis, physiological-biochemical features, nucleotide sequences, 16S rRNA gene, identification, *Paenibacillus sp.*

For citation: Sapunova L. I., Lobanok A. G., Yatsevich K. K., Kulish S. A., Tamkovich I. A., Yarkhova L. V., Sysaliatsin Y. M. Screening, characterization and molecular-genetical identification of a new bacterial strain *Paenibacillus species*. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2019, vol. 63, no. 2, pp. 181–188 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-2-181-188>

Введение. В 1993 г. английскими исследователями С. Ash, F. G. Priest, M. D. Collins штаммы бактерий *Bacillus polytuxa* на основании ряда фенотипических свойств и состава нуклеотидных последовательностей гена 16S рРНК были реклассифицированы и в качестве типовых включены

в новый род *Paenibacillus* (*paeni* – почти, в переводе с лат.) [1]. Позднее (1997 г.) результаты секвенирования указанного гена и определения жирнокислотного состава клеток бактерий дали основание японским ученым причислить еще 6 видов бацилл (*B. alginolyticus*, *B. chondroitinus*, *B. curdlanolyticus*, *B. glucanolyticus*, *B. kobensis*, *B. thiaminolyticus*) к новой систематической группе и дополнить ее описание новыми признаками [2]. В настоящее время род *Paenibacillus* насчитывает около 200 представителей [3], постоянно пополняется, в том числе новыми видами [4–6].

Представители рода *Paenibacillus* широко распространены в природе, обычно выделяются из различных источников, включая воду и почву различных географических зон, ризосферу растений, их вегетативные и репродуктивные органы, некротические раны животных и человека [6]. Некоторые виды рода *Paenibacillus* вызывают оппортунистические инфекции людей, а *Paenibacillus larvae* – заболевание пчел, которое часто приводит к гибели пчелиных семей. Отдельные представители этой группы микроорганизмов вызывают порчу пастеризованных молочных продуктов [3; 7]. В то же время многие виды этого рода являются стимуляторами роста растений благодаря фиксации азота, солиubilизации фосфатов, продукции фитогормонов, секреции сидерофоров [3]. Они синтезируют разнообразные вещества антимикробного и инсектицидного действия, экзополисахариды и ферменты, что открывает перспективу их использования в технологиях производства лекарственных препаратов, средств стимуляции роста растений и защиты их от патогенов, биоудобрений, продуктов питания и кормов, текстильных изделий, косметики, бумаги, детергентов, биотоплива, а также в природоохранных биотехнологиях.

Целью настоящего исследования явились выделение, характеристика и идентификация нового бактериального штамма – продуцента комплекса биологически активных веществ, включающих внеклеточные полисахариды.

Материалы и методы исследования. Для скрининга продуцирующих полисахариды микроорганизмов использовали зерно пшеницы урожая 2016 г. Для этого зерновой субстрат (1 г/10 мл стерильного физиологического раствора) гидратировали (26–28 °С, 2 ч) при постоянном перемешивании, после чего отделяли фильтрованием в асептических условиях. Из фильтрата чистые культуры контаминирующего зерно микроорганизмов выделяли методом Дригальского на агаризованной среде Сабуро. Условия культивирования – 26–28 °С в течение 96 ч.

Отбор продуцирующих полисахариды микроорганизмов проводили визуально по характерной вязкой консистенции их колоний.

Ферментативную активность отобранного изолята ПС-К-17 определяли чашечным методом на агаризованной среде Лурия–Бертани, содержащей субстраты соответствующих ферментов, при 26–28 °С в течение 72 ч.

На свойство микробных культур синтезировать протеазу, амилазу, ксиланазу, бета-глюканидазу, целлюлазу, фитазу, липазу, пектацетилазу, бета-галактозидазу, альгиназу указывали наличие и размер (мм) зон просветления или зон специфического окрашивания конечных продуктов ферментативных реакций вокруг их колоний, образующихся в результате гидролиза соответствующих субстратов в присутствии индикаторов. О продукции бета-галактозидазы судили по синей окраске колоний микроорганизмов, выросших на среде с 5-бром-4-хлор-3-индолил-β-D-галактопиранозидом в качестве хромогенного субстрата.

Исследование культурально-морфологических и физиолого-биохимических особенностей отобранного штамма ПС-К-17 проводили общепринятыми методами.

Молекулярно-генетическую идентификацию штамма ПС-К-17 проводили методом сравнительного анализа нуклеотидной последовательности гена 16S рРНК. Для этого геномную ДНК выделяли с использованием набора реагентов для выделения ДНК «Нуклеосорб» (Праймтех, Беларусь), придерживаясь рекомендаций производителя. Матрицу для секвенирования синтезировали ПЦР-методом, используя праймеры 27f (5' GAGTTTGATCCTGGCTCAG 3') и rD1 (5' AGAAAGGAGGT GATCCAGCC 3').

Реакционная смесь (30 мкл) содержала: 3 мкл 10х реакционного буфера (Диалат Лтд., Россия), 1,5 мМ MgCl₂, 0,2 мМ каждого из дезоксирибонуклеозидтрифосфатов, по 30 пкмоль каждого из праймеров, 1 единицу активности *Taq*-полимеразы (Диалат Лтд., Россия) и 15 нг геномной ДНК в качестве матрицы.

ПЦР проводили в термоциклере MJ Mini™ (BioRad, США). Реакцию инициировали инкубированием смеси при 95 °С в течение 4 мин, затем следовало 30 циклов, выполняемых в следующих условиях: 94 °С – 30 с, 55 °С – 30 с, 72 °С – 2 мин. Завершающую элонгацию проводили при 72 °С в течение 7 мин. Продукты амплификации разделяли в 1 %-ном агарозном геле. Фрагмент размером около 1,5 т. п. н. вырезали, а затем очищали с использованием набора Agarose Gel Extraction Kit (Jena Bioscience, Германия) согласно инструкциям производителя.

Секвенирование фрагмента гена 16S рРНК идентифицируемого штамма ПС-К-17 проводили на автоматическом секвенаторе ABI PRISM 310 Genetic Analyzer (Applied Biosystems, США) с использованием набора BigDye Terminator v3.1 Cycle Sequencing Kit (Applied Biosystems, США), придерживаясь рекомендаций производителя. При проведении «секвенирующей ПЦР», помимо праймеров 27f и rD1, использовали «внутренние» праймеры 536f (5' CAGCMGCCGCGGTAATWC 3') и 960r (5' GCTTGTGCGGGYCCCCG 3'). Полученные в результате секвенирования данные обрабатывали с использованием программы Sequencing Analysis Software v5.2 (Applied Biosystems, США).

Поиск гомологичных нуклеотидных последовательностей генов 16S рРНК осуществляли с помощью программы BLAST (Basic Local Alignment Search Tool) в базе данных GenBank Национального центра биотехнологической информации США [8]. Филогенетический анализ проводили с помощью программы MEGA4 [9], используя алгоритм «объединения соседей».

Приведенные результаты представляют собой усредненные данные 2–3 опытов, выполненных в трех повторностях и статистически обработанных с использованием компьютерных программ из пакета Microsoft Windows.

Результаты и их обсуждение. Свойство синтезировать внеклеточные полисахариды широко распространено у бактерий рода *Paenibacillus*, среди которых штаммы *P. polymyxa* EJS-3 и *P. polymyxa* ATCC 21830 известны как промышленные продуценты левана и курдлана [7]. Для представителей этой группы микроорганизмов характерно использование в качестве источников углеродного питания углеводов различного химического строения, в том числе полисахаридов, что возможно при условии синтеза бактериями соответствующих деполимераз. В последние годы выявлены новые штаммы бактерий рода *Paenibacillus*, продуцирующие хитиназу [10], пуллулазу [11], бета-агаразу [12], липазу [13], бифункциональную ксиланазу/бета-глюкканазу [14], бета-галактозидазу [15], альфа-амилазу [16], пектиназу [17] и др.

Из зерна пшеницы, контаминированного образующей полисахарид микрофлорой (рис. 1), нами по признаку образования вязких растекающихся колоний на агаризованной среде Лурия–Бертани с высоким содержанием лактозы выделена чистая культура бактерий ПС-К-17 (рис. 2).

Изолят ПС-К-17 – это грамположительные, факультативно анаэробные, образующие эллипсоидальные эндоспores, подвижные палочки с перитрихально расположенными жгутиками, растет в диапазоне температуры 5–39 °С и исходной активной кислотности среды, соответствующей рН 5–11, с оптимумом при температуре 30 °С и рН 6,0.



Рис. 1. Основные морфологические типы микроорганизмов, обнаруженных на зерне пшеницы (агаризованная среда Сабуро)

Fig. 1. The main morphological types of microorganisms detected on wheat grains (Sabouraud agar medium)

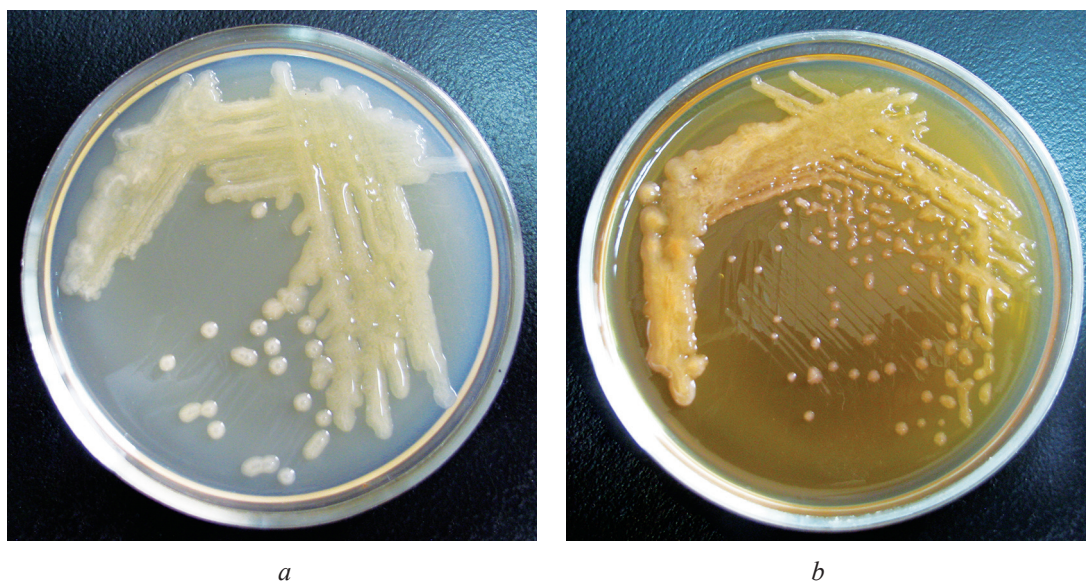


Рис. 2. Колонии изолята ПС-К-17 на агаризованных средах Сабуро (а) и Лурия–Бертани с лактозой (b)
Fig. 2. Colonies of PS-K-17 isolate on Sabouraud agar (a) and Luria–Bertani agar media with lactose (b)

На 3 сут роста на агаризованной среде Сабуро штамм образует слизистые колонии размером 4–5 мм бежевого цвета, со временем приобретающие розовый оттенок, неправильно круглой формы, выпуклые, гладкие, с ровным краем, вязкой консистенции.

На 3 сут роста на агаризованной среде Лурия–Бертани с лактозой (10 %) бактерии формируют колонии 2–3 мм в диаметре, выпуклые, вязкие, гладкие, сначала бежевого, а затем бежево-розового цвета, с ровными краями.

Изолят ПС-К-17 молоко не пептонизирует, желатин разжижает.

Ассимилирует глюкозу, фруктозу, галактозу, маннозу, маннит, лактозу, мальтозу, сахарозу, глицерин, крахмал, пектин, натрий-казеинат, бета-глюкан, натрий-карбоксиметилцеллюлозу, натрий-альгинат, твин-80, глицерилтрибутират (трибутирин).

На агаризованных средах со специфическими субстратами и в глубинной культуре синтезирует бета-галактозидазу, амилазу, протеазу, пектиназу, целлюлазу, бета-глюканазу, липазу (эстеразу), альгиназу, а также внеклеточные полисахариды и, возможно, каротиноидные пигменты.

Для установления таксономической принадлежности штамма ПС-К-17 проведен сравнительный анализ нуклеотидной последовательности гена 16S рРНК. В результате выполненных молекулярно-генетических исследований определена и депонирована в GenBank (код доступа MF443394) следующая нуклеотидная последовательность указанного гена протяженностью 1462 п. о.:

```

1      tgcaagtcga gcgagtgga ygagaagctt gcttctcgga tgcttagcgg cggacgggtg
61     agtaacacgt aggcaactg ccctcaagct tgggacaact accggaacg gtagctaata
121    ccgaatacat gattgttcg cctgaacgaa ttggaaaga cggagcaatc tgtcactga
181    ggatgggctc gcggcgcat agctagtgg tgagtaacg gctaccaag gcgacgatgc
241    gtagccgacc tgagagggtg atcgccaca ctgggactga gacacggccc agactcctac
301    gggaggcagc agtagggaat ctccgcaat ggacgcaagt ctgacggagc aacgccgctg
361    gagtgatgaa ggttttcgga tcgtaaagct ctgtgccag ggaagaacgt cggatagagt
421    aactgctatc ggagtacgg tacctgagaa gaaagccccg gctaactacg tgccagcagc
481    cgcggtaata cgtagggggc aagcgtgtc cggattatt gggcgtaaag cgcgcgagg
541    cggctttta agtccggtg cacagccca ggctcaacct tgggtcgac tggaactgg
601    agacttgag tacagaagag gaaagtggaa ttccacgtg agcggtgaaa tgcgtagaga
661    tgtggaggaa caccagtggc gaaggcgact tctgggctg taactgacgc tgaggcgcga
721    aagcgtgggg agcaacagg attagatacc ctggtagtc acgccgtaa cgatgaatgc
781    taggtgtag gggttcgt accttgggt cgaagttaa cacattaagc attccgctg

```


841 gggagtacgg tcgcaagact gaaactcaaa ggaattgacg gggaccgca caagcagtgg
 901 agtatgtggt ttaattcga gcaacgcgaa gaaccttacc aagtcttgac atcccttga
 961 ccggactaga gatagtctt tccttcggga caaaggagac aggtggtgca tggttgctgt
 1021 cagctcgtgt cgtgagatgt tgggtaagt cccgcaacga gcgcaaccct tatgcttagt
 1081 tgccagcaca tcatgggtggg cactctaagc agactgccgg tgacaaaccg gaggaaggtg
 1141 gggatgacgt caaatcatca tgccccctat gacttgggct acacacgtac tacaatggcc
 1201 ggtacaacgg gaagcaatat cgcaagatgg agccaatcct taaaagccgg tctcagttcg
 1261 gattgcagcg tgcaactcgc ctgcatgaag tcggaattgc tagtaatcgc ggatcagcat
 1321 gccgcggtga atacgtccc gggcttggta cacaccgcc gtcacaccac gagagtttgc
 1381 aacaccgaa gtcggtgggg taacctgcaa aggagccagc cgccaaggt ggggtgatg
 1441 attggggtga agtcgtaaca ag

Результат BLAST-поиска в упомянутой базе данных показал, что ген 16S рРНК исследуемого изолята действительно имел наибольшую степень сходства с соответствующими генами бактерий рода *Paenibacillus*.

При попарном сравнении нуклеотидных последовательностей генов 16S рРНК установлено их максимальное сходство у исследуемого штамма ПС-К-17 и типовых штаммов *Paenibacillus nicotianaе* (98,3 %), *P. hordei* (98,2 %), *P. kyungheensis* (97,9 %) (таблица).

Сходство (%) нуклеотидных последовательностей генов 16S рРНК изолята ПС-К-17 и близкородственных бактерий из базы данных GenBank

Similarity (%) of nucleotide sequences of 16S rRNA gene of the isolate PS-K-17 and closely related bacteria from GenBank

Штамм бактерий (номер доступа в GenBank) Bacterial strain (access code in GenBank)	Сходство нуклеотидных последовательностей генов 16S рРНК, % Similarity of nucleotide sequences of 16S rRNA genes, %
<i>Paenibacillus nicotianaе</i> YIM h-19 ^T (NR_134783)	98,3
<i>Paenibacillus hordei</i> RH-N24 ^T (NR_109318)	98,2
<i>Paenibacillus kyungheensis</i> DCY88 ^T (NR_145628)	97,9
<i>Paenibacillus illinoisensis</i> JCM 9907 ^T (NR_040884)	95,0
<i>Paenibacillus wulumuqiensis</i> Y24 ^T (NR_136854)	95,0
<i>Paenibacillus peoriae</i> DSM 8320 ^T (NR_117740)	94,8
<i>Paenibacillus xylanilyticus</i> XIL14 ^T (NR_029109)	94,8
<i>Paenibacillus hunanensis</i> FeL05 ^T (NR_116440)	94,6
<i>Paenibacillus polymyxa</i> DSM 36 ^T (NR_117727)	94,5
<i>Paenibacillus tundrae</i> A10b ^T (NR_044525)	94,5
<i>Paenibacillus kribbensis</i> AM49 ^T (NR_025169)	94,4

Уровень сходства нуклеотидных последовательностей гена 16S рРНК у представителей других близкородственных видов рода *Paenibacillus* (*P. illinoisensis*, *P. wulumuqiensis*, *P. peoriae*, *P. xylanilyticus*, *P. hunanensis*) составлял 95 % и менее.

Филогенетический анализ, учитывающий степень сходства нуклеотидных последовательностей генов 16S рРНК, выявил наибольшую близость изолята ПС-К-17 с типовыми штаммами *Paenibacillus nicotianaе*, *P. hordei* и *P. kyungheensis* (рис. 3).

Установленное значение бутстрапа (100) для всего сформированного кластера свидетельствует о статистической достоверности кластеризования. Однако в пределах данной ветви штамм ПС-К-17 расположен обособленно от группы *P. nicotiana*–*P. hordei*–*P. kyungheensis*.

Принимая во внимание результаты филогенетического анализа и достаточно высокий уровень межвидового полиморфизма нуклеотидных последовательностей гена 16S рРНК в пределах данного кластера (до 1,7–2,3 %) штамм ПС-К-17 можно идентифицировать лишь до рода, а именно как *Paenibacillus* sp. ПС-К-17, близкородственный группе видов *P. nicotiana*–*P. hordei*–*P. kyungheensis*. Требуется дополнительные хемотаксономические исследования, которые позволят уточнить видовую принадлежность *Paenibacillus* sp. ПС-К-17 – отнести его к одному из известных видов или признать его новым.

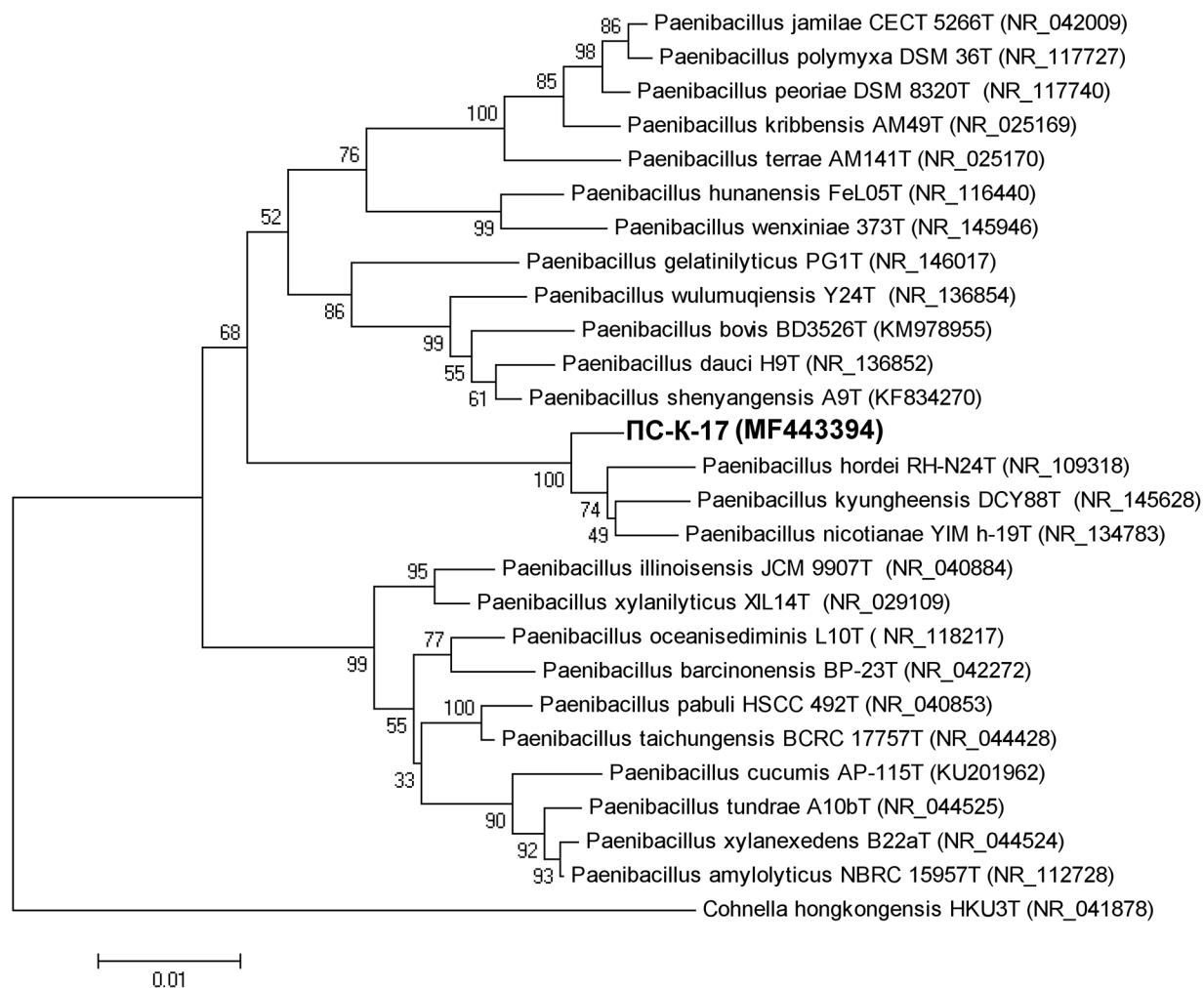


Рис. 3. Филогенетическое древо, отражающее родство изолята ПС-К-17 и близкородственных видов рода *Paenibacillus*: в скобках приведены номера доступа последовательностей в GenBank (www.ncbi.nlm.nih.gov). Блок сравнения содержит 1368 нуклеотидов. Значения бутстрапа вычислены на основании анализа 1000 деревьев. Линейка соответствует 0,01 заменам на нуклеотидную позицию

Fig. 3. Phylogenetic tree showing the relatedness between the strain PS-K-17 and the closely related type strains of the genus *Paenibacillus*: the GenBank accession numbers of the sequences are given in parentheses (www.ncbi.nlm.nih.gov). There are 1368 nucleotides in the comparison dataset. Bootstrap values were calculated based on 1000 resamplings. Scale bar, 0.01 substitution per nucleotide position

Заклучение. На основании результатов культурально-морфологических, физиолого-биохимических и молекулярно-генетических исследований штамм бактерий ПС-К-17 идентифицирован как *Paenibacillus* species. Штамм *Paenibacillus* sp. ПС-К-17 продуцирует полисахариды и ферменты, гидролизующие растительные полимеры, что обуславливает перспективность его использования в биотехнологии получения указанных биологически активных веществ. Штамм *Paenibacillus* sp. ПС-К-17 также планируется использовать как один из компонентов сложного консорциума микроорганизмов в составе новой кормовой добавки полифункционального назначения.

Список использованных источников

1. Ash, C. Molecular identification of rRNA group 3 bacilli (Ash, Farrow, Wallbanks and Collins) using a PCR probe test. Proposal for the creation of a new genus *Paenibacillus* / C. Ash, F. G. Priest, M. D. Collins // *Antonie van Leeuwenhoek*. – 1993. – Vol. 64, N 3–4. – P. 253–260. <https://doi.org/10.1007/bf00873085>
2. Transfer of *Bacillus alginolyticus*, *Bacillus chondroitinus*, *Bacillus curdlanolyticus*, *Bacillus glucanolyticus*, *Bacillus kobensis*, and *Bacillus thiaminolyticus* to the genus *Paenibacillus* and emended description of the genus *Paenibacillus* / O. Shida [et al.] // *Int. J. Syst. Bacteriol.* – 1997. – Vol. 47, N 2. – P. 289–298. <https://doi.org/10.1099/00207713-47-2-289>

3. Current knowledge and perspectives of *Paenibacillus*: a review / E. N. Grady [et al.] // *Microb. Cell Fact.* – 2016. – Vol. 15, N 1. – P. 203. <https://doi.org/10.1186/s12934-016-0603-7>
4. *Paenibacillus hordei* sp. nov., isolated from naked barley in Korea / J. M. Kim [et al.] // *Antonie Van Leeuwenhoek.* – 2013. – Vol. 103, N 1. – P. 3–9. <https://doi.org/10.1007/s10482-012-9775-2>
5. *Paenibacillus nicotianae* sp. nov., isolated from a tobacco sample / Q. Q. Li [et al.] // *Antonie Van Leeuwenhoek.* – 2014. – Vol. 106, N 6. – P. 1199–1205. <https://doi.org/10.1007/s10482-014-0289-y>
6. *Paenibacillus kyungheensis* sp. nov., isolated from flowers of magnolia / M. Z. Siddiqi [et al.] // *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.* – 2015. – Vol. 65, N 11. – P. 3959–3964. <https://doi.org/10.1099/ijsem.0.000521>
7. Liang, T.-W. Recent advances in exopolysaccharides from *Paenibacillus* spp.: production, isolation, structure, and bioactivities / T.-W. Liang, S.-L. Wang // *Mar. Drugs.* – 2015. – Vol. 13, N 4. – P. 1847–1863. <https://doi.org/10.3390/md13041847>
8. BLAST (Basic Local Alignment Search Tool) [Electronic resource]. – Mode of access: <https://blast.ncbi.nlm.nih.gov/Blast.cgi>. – Date of access: 12.02.2018.
9. MEGA4: Molecular Evolutionary Genetics Analysis (MEGA) software version 4.0 / K. Tamura [et al.] // *Mol. Biol. Evol.* – 2007. – Vol. 24, N 8. – P. 1596–1599. <https://doi.org/10.1093/molbev/msm092>
10. A process for complete biodegradation of shrimp waste by a novel marine isolate *Paenibacillus* sp. AD with simultaneous production of chitinase and chitin oligosaccharides / A. Kumar [et al.] // *Int. J. Biol. Macromol.* – 2018. – Vol. 109. – P. 263–272. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.12.024>
11. Gene cloning, functional expression and characterisation of a novel type I pullulanase from *Paenibacillus barengoltzii* and its application in resistant starch production / J. Liu [et al.] // *Protein Expr. Purif.* – 2016. – Vol. 121. – P. 22–30. <https://doi.org/10.1016/j.pep.2015.12.020>
12. Purification and characterization of a novel β -agarase of *Paenibacillus* sp. SSG-1 isolated from soil / T. Song [et al.] // *J. Biosci. Bioeng.* – 2014. – Vol. 118, N 2. – P. 125–129. <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2014.02.008>
13. Cloning, overexpression, and characterization of a novel organic solvent-tolerant lipase from *Paenibacillus pasadenensis* CS0611 / J. Gao [et al.] // *Chinese J. Catal.* – 2018. – Vol. 39, N 5. – P. 937–945. [https://doi.org/10.1016/s1872-2067\(18\)63033-5](https://doi.org/10.1016/s1872-2067(18)63033-5)
14. The family 22 carbohydrate-binding module of bifunctional xylanase/ β -glucanase Xyn10E from *Paenibacillus curd-lanolyticus* B-6 has an important role in lignocellulose degradation / J. Sermsathanaswadi [et al.] // *Enzyme Microb. Technol.* – 2017. – Vol. 96. – P. 75–84. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2016.09.015>
15. Biochemical characterization of a novel β -galactosidase from *Paenibacillus barengoltzii* suitable for lactose hydrolysis and galactooligosaccharides synthesis / Y. Liu [et al.] // *Int. J. Biol. Macromol.* – 2017. – Vol. 104, pt. A. – P. 1055–1063. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.06.073>
16. Purification and characterization of a novel intracellular α -amylase with a wide variety of substrates hydrolysis and transglycosylation activity from *Paenibacillus* sp. SSG-1 / Q. Xu [et al.] // *Protein Expr. Purif.* – 2018. – Vol. 144. – P. 62–70. <https://doi.org/10.1016/j.pep.2016.04.007>
17. Identification and characterization of a pectinolytic enzyme from *Paenibacillus xylanolyticus* / S. Giacobbe [et al.] // *BioResour.* – 2014. – Vol. 9, N 3. – P. 4873–4887. <https://doi.org/10.15376/biores.9.3.4873-4887>

References

1. Ash C., Priest F. G., Collins M. D. Molecular identification of rRNA group 3 bacilli (Ash, Farrow, Wallbanks and Collins) using a PCR probe test. Proposal for the creation of a new genus *Paenibacillus*. *Antonie van Leeuwenhoek*, 1993, vol. 64, no. 3–4, pp. 253–260. <https://doi.org/10.1007/bf00873085>
2. Shida O., Takagi H., Kadowaki K., Nakamura L. K., Komagata K. Transfer of *Bacillus alginolyticus*, *Bacillus chondroitinus*, *Bacillus curd-lanolyticus*, *Bacillus glucanolyticus*, *Bacillus kobensis*, and *Bacillus thiaminolyticus* to the genus *Paenibacillus* and emended description of the genus *Paenibacillus*. *International Journal of Systematic Bacteriology*, 1997, vol. 47, no. 2, pp. 289–298. <https://doi.org/10.1099/00207713-47-2-289>
3. Grady E. N., MacDonald J., Liu L., Richman A., Yuan Z.-C. Current knowledge and perspectives of *Paenibacillus*: a review. *Microbial Cell Factories*, 2016, vol. 15, no. 1, pp. 203. <https://doi.org/10.1186/s12934-016-0603-7>
4. Kim J. M., Lee S. H., Lee S. H., Choi E. J., Jeon C. O. *Paenibacillus hordei* sp. nov., isolated from naked barley in Korea. *Antonie Van Leeuwenhoek*, 2013, vol. 103, no. 1, pp. 3–9. <https://doi.org/10.1007/s10482-012-9775-2>
5. Li Q. Q., Zhou X. K., Dang L. Z., Cheng J., Hozzein W. N., Liu M. J., Hu Q., Li W. J., Duan Y. Q. *Paenibacillus nicotianae* sp. nov., isolated from a tobacco sample. *Antonie Van Leeuwenhoek*, 2014, vol. 106, no. 6, pp. 1199–1205. <https://doi.org/10.1007/s10482-014-0289-y>
6. Siddiqi M. Z., Siddiqi M. H., Im W. T., Kim Y. J., Yang D. C. *Paenibacillus kyungheensis* sp. nov., isolated from flowers of magnolia. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2015, vol. 65, no. 11, pp. 3959–3964. <https://doi.org/10.1099/ijsem.0.000521>
7. Liang T.-W., Wang S.-L. Recent advances in exopolysaccharides from *Paenibacillus* spp.: production, isolation, structure, and bioactivities. *Marine Drugs*, 2015, vol. 13, no. 4, pp. 1847–1863. <https://doi.org/10.3390/md13041847>
8. BLAST (Basic Local Alignment Search Tool) (2018). Available at: <https://blast.ncbi.nlm.nih.gov/Blast.cgi> (accessed 12 February 2018).
9. Tamura K., Dudley J., Nei M., Kumar S. MEGA4: Molecular Evolutionary Genetics Analysis (MEGA) software version 4.0. *Molecular Biology and Evolution*, 2007, vol. 24, no. 8, pp. 1596–1599. <https://doi.org/10.1093/molbev/msm092>
10. Kumar A., Kumar D., George N., Sharma P., Gupta N. A process for complete biodegradation of shrimp waste by a novel marine isolate *Paenibacillus* sp. AD with simultaneous production of chitinase and chitin oligosaccharides. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, vol. 109, pp. 263–272. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.12.024>

11. Liu J., Liu Y., Yan F., Jiang Z., Yang S., Yan Q. Gene cloning, functional expression and characterisation of a novel type I pullulanase from *Paenibacillus barengoltzii* and its application in resistant starch production. *Protein Expression and Purification*, 2016, vol. 121, pp. 22–30. <https://doi.org/10.1016/j.pep.2015.12.020>
12. Song T., Cao Y., Xu H., Zhang W., Fei B., Qiao D., Cao Y. Purification and characterization of a novel β -agarase of *Paenibacillus* sp. SSG-1 isolated from soil. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2014, vol. 118, no. 2, pp. 125–129. <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2014.02.008>
13. Gao J., Ou X., Xu P., Zong M., Lou W. Cloning, overexpression, and characterization of a novel organic solvent-tolerant lipase from *Paenibacillus pasadenensis* CS0611. *Chinese Journal of Catalysis*, 2018, vol. 39, no. 5, pp. 937–945. [https://doi.org/10.1016/s1872-2067\(18\)63033-5](https://doi.org/10.1016/s1872-2067(18)63033-5)
14. Sermsathanaswadi J., Baramée S., Tachaapaikoon C., Pason P., Ratanakhanokchai K., Kosugi A. The family 22 carbohydrate-binding module of bifunctional xylanase/ β -glucanase Xyn10E from *Paenibacillus curdlanolyticus* B-6 has an important role in lignocellulose degradation. *Enzyme and Microbial Technology*, 2017, vol. 96, pp. 75–84. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2016.09.015>
15. Liu Y., Chen Z., Jiang Z., Yan Q., Yang S. Biochemical characterization of a novel β -galactosidase from *Paenibacillus barengoltzii* suitable for lactose hydrolysis and galactooligosaccharides synthesis. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2017, vol. 104, pt. A, pp. 1055–1063. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.06.073>
16. Xu Q., Cao Y., Li X., Liu L., Qin S., Wang Y., Cao Y., Xu H., Qiao D. Purification and characterization of a novel intracellular α -amylase with a wide variety of substrates hydrolysis and transglycosylation activity from *Paenibacillus* sp. SSG-1. *Protein Expression and Purification*, 2018, vol. 144, pp. 62–70. <https://doi.org/10.1016/j.pep.2016.04.007>
17. Giacobbe S., Pepe S., Ventorino V., Birolo L., Vinciguerra R., Faraco V. Identification and characterisation of a pectinolytic enzyme from *Paenibacillus xylanolyticus*. *BioResources*, 2014, vol. 9, no. 3, pp. 4873–4887. <https://doi.org/10.15376/biores.9.3.4873-4887>

Информация об авторах

Сапунова Леонида Ивановна – канд. биол. наук, доцент, гл. науч. сотрудник. Институт микробиологии НАН Беларуси (ул. Купревича, 2, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: leonida@mbio.bas-net.by.

Лобанок Анатолий Георгиевич – академик, д-р биол. наук, заведующий лабораторией. Институт микробиологии НАН Беларуси (ул. Купревича, 2, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: aglobanok@gmail.com.

Яцевич Констанция Константиновна – науч. сотрудник. Институт генетики и цитологии НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220027, Минск, Республика Беларусь). E-mail: yakon-kon@yandex.ru.

Кулиш Светлана Анатольевна – ст. науч. сотрудник. Институт микробиологии НАН Беларуси (ул. Купревича, 2, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: kulish76@mail.ru.

Тамкович Ирина Олеговна – канд. биол. наук, ст. науч. сотрудник. Институт микробиологии НАН Беларуси (ул. Купревича, 2, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: irina-kazakevich@tut.by.

Ерхова Людмила Викторовна – мл. науч. сотрудник. Институт микробиологии НАН Беларуси (ул. Купревича, 2, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: milka1288@mail.ru.

Сысолятин Евгений Николаевич – мл. науч. сотрудник. Институт генетики и цитологии НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220027, Минск, Республика Беларусь). E-mail: meeugeny@yandex.ru.

Information about the authors

Sapunova Leanida Ivanovna – Ph. D. (Biology), Chief researcher. Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus (2, Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: leonida@mbio.bas-net.by.

Lobanok Anatoli Georgievich – Academician, D. Sc. (Biology), Head of the Laboratory. Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus (2, Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: aglobanok@gmail.com.

Yatsevich Kanstantsya Kanstantsynauna – Researcher. Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220027, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: yakon-kon@yandex.ru.

Kulish Sviatlana Anatolievna – Senior researcher. Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus (2, Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kulish76@mail.ru.

Tamkovich Iryna Alehauna – Ph. D. (Biology), Senior researcher. Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus (2, Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: irina-kazakevich@tut.by.

Yarkhova Liudmila Viktarauna – Junior researcher. Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus (2, Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: milka1288@mail.ru.

Sysaliatsin Yauhen Mikalaevich – Junior researcher. Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220027, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: meeugeny@yandex.ru.

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

УДК 577.3+538.958
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-2-189-197>

Поступило в редакцию 10.10.2018
Received 10.10.2018

**М. С. Терехова¹, Д. В. Григорьева¹, И. В. Горудко¹, И. В. Семак¹,
А. В. Соколов², О. М. Панасенко³, академик С. Н. Черенкевич¹**

¹Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

²Институт экспериментальной медицины, Санкт-Петербург, Российская Федерация

³Федеральный научно-клинический центр физико-химической медицины
Федерального медико-биологического агентства, Москва, Российская Федерация

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛАКТОФЕРРИНА В УСЛОВИЯХ ОКИСЛИТЕЛЬНОГО/ГАЛОГЕНИРУЮЩЕГО СТРЕССА

Аннотация. Лактоферрин (Лф) является перспективным объектом для использования в качестве лекарственного средства благодаря ряду полезных свойств (антибактериальное, противовирусное, про- и противовоспалительное и др.). Он содержится в секрете экзокринных желез, во вторичных гранулах нейтрофилов, в молоке человека и некоторых животных. Концентрация Лф быстро увеличивается в очагах воспаления за счет дегрануляции нейтрофилов. Там же за счет активации нейтрофилов идет наработка высокореакционных активных форм кислорода и галогенов, что приводит к развитию окислительного/галогенирующего стресса. В данной работе с помощью флуоресцентных методов впервые показано изменение структуры и свойств Лф (выделенного из женского грудного молока и рекомбинантного Лф человека, выделенного из молока трансгенных коз), находящегося в условиях воспаления (окислительный/галогенирующий стресс). Установлено, что HOCl вызывает модификацию аминокислотного состава Лф (изменение числа триптофанов и первичных аминов), а также перестройку глобулы. В то же время при действии H₂O₂ вышеперечисленные изменения не наблюдаются. Произшедшие с молекулой изменения при действии HOCl проявляются в уменьшении способности Лф связывать ионы железа.

Ключевые слова: лактоферрин, окислительный/галогенирующий стресс, конформация белка, железосвязывающая способность

Для цитирования. Физико-химические свойства лактоферрина в условиях окислительного/галогенирующего стресса / М. С. Терехова [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2019. – Т. 63, № 2. – С. 189–197. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-2-189-197>

**Maria S. Terekhova¹, Daria V. Grigorieva¹, Irina V. Gorudko¹, Igor V. Semak¹,
Aleksey V. Sokolov², Oleg M. Panasenko³, Academician Sergey N. Cherenkevich¹**

¹Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

²Institute of Experimental Medicine, Saint-Petersburg, Russian Federation

³Federal Research and Clinical Center of Physical-Chemical Medicine of the Federal Medical Biological Agency,
Moscow, Russian Federation

PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES OF LACTOFERRIN UNDER OXIDATIVE/HALOGENATIVE STRESS

Abstract. Lactoferrin (Lf) was discovered in the thirties of the twentieth century. Since that time a number of useful properties of Lf (antibacterial, antiviral, pro- and anti-inflammatory, etc.) have been found. That's why Lf became a promising candidate for pharmaceuticals use. The concentration of Lf strikingly increases in inflammatory foci due to neutrophil degranulation. At the same time, activated neutrophils start to generate reactive oxygen and halogen species (ROS and RHS), which leads to the development of oxidative/halogenative stress. In this work, using the fluorescence analysis we found the change of the Lf structure and properties in the inflammation conditions (under oxidative/halogenative stress). We use two forms of Lf – human Lf, excreted from human milk, and recombinant Lf, excreted from milk of transgenic goats. It was established that the amino acids of Lf (decreasing the number of tryptophanils and primary amines) and protein restructuring undergo modification under the HOCl action, while H₂O₂ has no influence. These changes in the molecule under the HOCl treatment result in decreasing the iron-binding capacity of Lf.

Keywords: lactoferrin, oxidative/halogenative stress, protein conformation, iron-binding capacity

For citation: Terekhova M. S., Grigorieva D. V., Gorudko I. V., Semak I. V., Sokolov A. V., Panasenko O. M., Cherenkevich S. N. Physicochemical properties of lactoferrin under oxidative/halogenative stress. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2019, vol. 63, no. 2, pp. 189–197 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-2-189-197>

Введение. Лактоферрин (Лф) представляет собой железосвязывающий гликопротеин с молекулярной массой ~80 кДа, относящийся к семейству трансферринов [1]. В молекуле Лф выделяют две глобулярные доли (N и C), соединенные коротким α -спиральным участком. Доли имеют схожую пространственную структуру и аминокислотную последовательность [1–3]. В каждой доле находится по одному железосвязывающему сайту, состоящему из двух атомов кислорода фенолят-ионов Туг-92 и Туг-192, карбоксильного кислорода Asp-60 и атома азота имидазола His-253 для N-доли [1]. Ионы железа Fe^{3+} связываются прочно ($K_d \sim 10^{-20} M^{-1}$), но обратимо. Лф может существовать как в апо- (свободной от железа), так и в холо-форме [1; 2]. В нативном состоянии (апо-форма) железосвязывающая полость N-доли полностью открыта, в то время как C-доля остается закрытой. Связывание иона железа N-долей сопровождается конформационными изменениями C-доли, после чего она открывается и происходит связывание второго иона железа [1; 2].

В настоящее время интерес к Лф продиктован рядом его полезных свойств, которые стали причиной использования Лф в качестве лекарственного средства. Так, Лф проявляет антибактериальное действие, обладает противовоспалительной, противовирусной активностью, способен ингибировать развитие раковых заболеваний и поддерживать рост пробиотической микрофлоры [2]. Кроме того, Лф является маркером воспалительного процесса, поскольку его концентрация в очагах воспаления и местах инфекции быстро возрастает (и достигает 200 мкг/мл) за счет дегрануляции нейтрофилов, во вторичных гранулах которых и содержится белок [2]. Лф также был найден в секрете экзокринных желез, молоке человека и других млекопитающих.

Известно, что Лф способен связываться со специфическими рецепторами иммунных, эпителиальных и эндотелиальных клеток [2]. Ранее нами было установлено, что Лф из разных источников (из молока человека – чЛф, из молока трансгенных коз – рЛф) в различной степени стимулирует дегрануляцию и увеличение внутриклеточной концентрации ионов кальция в нейтрофилах [3].

Нейтрофилы являются клетками врожденного звена иммунной системы, обеспечивающими защиту организма за счет проявления различных видов функциональной активности, таких как дегрануляция, респираторный взрыв, фагоцитоз, образование внеклеточных ловушек (NETs). Образующийся в результате активации НАДФН-оксидазного комплекса супероксид анион-радикал может спонтанно или в присутствии катализатора дисмутировать в H_2O_2 . H_2O_2 является слабореакционной молекулой, проявляющей себя как мягкий окислитель или восстановитель [4]. Также он является вторичным мессенджером, передача сигнала происходит за счет модификации тиольных остатков в белке и аминокислотных остатков Туг, Трп, His [5]. Концентрация H_2O_2 в организме варьируется. Концентрация H_2O_2 в крови может достигать 35 мкМ [4], а в очагах воспаления – 100–500 мкМ [6].

Взаимодействие H_2O_2 с миелопероксидазой (МПО) необходимо для образования соединения I ($МПО^{+} - Fe^{4+} = O$), которое катализирует реакции пероксидазного либо галогенирующего цикла. МПО представляет собой гем-содержащий фермент азурофильных гранул нейтрофилов, высвобождающийся в результате дегрануляции. Соединение I может вступать в цикл галогенирования, катализируя двухэлектронное окисление галогенидов X^- (I^- , Br^- , Cl^-) до соответствующих гипогалоидных кислот, которые принято называть активными формами галогенов (АФГ) [7; 8]. Так как в результате активации нейтрофилы *in vitro* способны наработать вплоть до 100 мкМ $HOCl$, то локальная концентрация $HOCl$ около активированных нейтрофилов *in vivo* может быть значительно больше [7; 8].

$HOCl$ является высокореакционным соединением и участвует в реакциях окисления и галогенирования [9]. Основными мишенями для $HOCl$ в белках являются серосодержащие аминокислотные остатки (Cys и Met), а также остатки His, Трп, Lys, Arg, дисульфидные связи и свободные NH_2 -группы [10]. В результате действия $HOCl$ в белковой молекуле может происходить образование хлораминов и хлорамидов, дополнительных дисульфидных сшивок, деструкция пептидной связи, что ведет к фрагментации или агрегации белка и нарушению его свойств [8].

Обобщив вышесказанное, можно заключить, что в очагах воспаления идет наработка высокореакционных АФК (O_2^- , HO^{\cdot} , H_2O_2) за счет активации НАДФН-оксидазы нейтрофилов и АФГ

(НОСl, НОВr и др.) за счет функционирования галогенирующего цикла МПО. В случае изменения функционального состояния антиоксидантной системы происходит накопление АФК и АФГ, что индуцирует развитие окислительного/галогенирующего стресса [8], в ходе которого идет модификация структуры и свойств различных биомолекул, в том числе молекул Лф, оказавшихся в очаге воспаления.

Цель работы – выявление механизмов модификации структуры (аминокислотного состава, конформации) и биологических свойств (железосвязывающей способности) Лф (чЛф и рЛф), опосредованных увеличением активности нейтрофилов (в условиях окислительного и галогенирующего стресса).

Материалы и методы исследования. Реактивы. В работе использовался фосфатно-солевой буферный раствор (ФСБ), содержащий 10 мМ $\text{Na}_2\text{HPO}_4/\text{KH}_2\text{PO}_4$, 137 мМ NaCl , 2,7 мМ KCl (рН 7,4). Флуоресцентные зонды (1-анилино-8-нафталин сульфонат (АНС), флуорескамин, скополетин) и белки (сывороточный альбумин человека (ЧСА), лизоцим) были получены от фирмы Reanal (Венгрия).

чЛф был получен из грудного молока здоровых доноров (Институт экспериментальной медицины, Санкт-Петербург), рЛф был выделен из молока трансгенных коз на кафедре биохимии Белорусского государственного университета (Минск).

Рабочие растворы NaOCl (Sigma, США) и H_2O_2 (Белмедпрепараты, Беларусь) готовили непосредственно перед экспериментом. Концентрация раствора NaOCl оценивалась спектрофотометрическим методом по поглощению OCl^- при 290 нм и рН 12, молярный коэффициент экстинкции $\epsilon_{290} = 350 \text{ M}^{-1}\text{cm}^{-1}$. Поскольку рК HOCl равняется 7,59, то при физиологических рН в растворе присутствуют одновременно примерно в равных концентрациях молекулярная (HOCl) и анионная (OCl^-) формы, следовательно, здесь и далее под HOCl понимается смесь HOCl/OCl^- .

Концентрация H_2O_2 оценивалась также спектрофотометрическим методом при длине волны 240 нм и рН 7,35, молярный коэффициент экстинкции $\epsilon_{240} = 43,6 \text{ M}^{-1}\text{cm}^{-1}$.

Исследование модификации белков при действии HOCl и H_2O_2 . Условия окислительного/галогенирующего стресса моделировали путем инкубации Лф с H_2O_2 (в 62-кратном мольном избытке) и HOCl (в 10–100-кратном мольном избытке). Модификация белка проводилась при комнатной температуре (23 °С) в течение 1,5–2 ч при умеренном перемешивании – один раз в начале и один раз в конце модификации. Флуоресцентные исследования проводились с использованием компьютеризированного спектрофлуориметра SM2203 (Солар, Беларусь) при 23 °С и постоянном перемешивании раствора.

Степень модификации функциональных групп белка после его обработки HOCl или H_2O_2 оценивалась путем анализа изменений интенсивности собственной флуоресценции белка, обусловленной флуоресценцией остатков триптофана ($\lambda_{\text{возб}} = 285 \text{ нм}$, $\lambda_{\text{регистр}} = 340 \text{ нм}$). Характер конформационных изменений оценивался с помощью зонда АНС ($\lambda_{\text{возб}} = 350 \text{ нм}$, $\lambda_{\text{регистр}} = 510 \text{ нм}$) [11]. Параметры флуоресценции зонда чувствительны к изменению полярности окружения, поэтому АНС используется для исследования агрегации, фрагментации и разворачивания белков. Изменения содержания свободных первичных аминов детектировались с помощью зонда флуорескамин ($\lambda_{\text{возб}} = 390 \text{ нм}$, $\lambda_{\text{регистр}} = 490 \text{ нм}$). Отсутствие непрореагировавших молекул HOCl и H_2O_2 в растворе Лф оценивалось флуоресцентным методом с использованием скополетина ($\lambda_{\text{возб}} = 350 \text{ нм}$, $\lambda_{\text{регистр}} = 460 \text{ нм}$).

Исследование железосвязывающей способности Лф. Лф может находиться в апо- (ненасыщенная железом) или холо-форме. Обе формы обладают максимумом спектра поглощения около 295 нм, однако в холо-форме появляется дополнительный максимум поглощения между 400 и 500 нм. Поэтому железосвязывающая способность Лф изучалась с использованием спектрофотометра RB2201 (Солар, Беларусь) спектрофотометрическим методом по изменению поглощения раствора при длине волны $\lambda = 465 \text{ нм}$, которое соответствует оптической плотности раствора при последовательных добавках соли Fe^{3+} ($\text{NH}_4\text{Fe}(\text{SO}_4)_2$), при 23 °С и постоянном перемешивании раствора.

Статистическая обработка данных проводилась с использованием программного пакета Origin 9.0. Данные представлены как среднее \pm стандартная ошибка среднего. Статистическая

значимость различий между значениями среднего рассчитывалась по критерию Стьюдента. Различия считались статистически достоверными при уровне значимости $p < 0,05$. Для определения параметров корреляции использовался критерий Пирсона. Представленные кинетические кривые являлись типичными для серии из 5–7 независимых экспериментов.

Результаты и их обсуждение. Изменение локальной структуры и внутримолекулярной динамики молекулы белка может быть определено при изучении собственной триптофановой флуоресценции. Молекула Лф содержит 10 остатков триптофана [1], кроме того, известно, что Тгр является одной из мишеней для НОСІ в белке (константа скорости реакции – $1,1 \cdot 10^4 \text{ M}^{-1}\text{s}^{-1}$) [10], поэтому представляется важным исследование изменения триптофановой флуоресценции Лф при действии НОСІ.

На рис. 1 представлены типичные спектры триптофановой флуоресценции нативного рЛф и белка, модифицированного НОСІ в различных мольных соотношениях. Из рисунка следует, что длина волны максимума спектра флуоресценции рЛф составляла $\lambda_{\text{max}} = 328 \pm 1 \text{ нм}$ и не изменялась при модификации белка, а интенсивность флуоресценции значительно уменьшалась. Исходя из литературных данных [12], положение максимума флуоресценции говорит о том, что остатки триптофана находятся на границе белковой глобулы. В ходе модификации рЛф НОСІ происходит разрушение триптофановых колец, что приводит к уменьшению интенсивности флуоресценции.

Установлено, что снижение интенсивности собственной триптофановой флуоресценции при добавлении 100-кратного мольного избытка НОСІ к раствору рЛф составило $91,4 \pm 2,5 \%$, а к раствору чЛф – $88,5 \pm 1,9 \%$.

Инкубация рЛф с H_2O_2 в мольном соотношении 1 : 62 сопровождалась уменьшением интенсивности триптофановой флуоресценции белка на $4,6 \pm 0,2 \%$, сдвига длины волны максимума спектра не происходило (данные не приведены). Модификация чЛф H_2O_2 также не приводила к изменениям параметров триптофановой флуоресценции белка. Таким образом, чЛф и рЛф проявляют схожую тенденцию при модификации остатков триптофана при действии НОСІ и относительную толерантность к H_2O_2 .

Главными мишенями для НОСІ в белке помимо триптофана являются Met, Cys, Lys, His и Arg [11]. Флуорескамин представляет собой флуоресцентную метку, способную флуоресцировать при реакции с первичными аминами белков (например, с лизином), находящимися преимущественно на поверхности белковой глобулы.

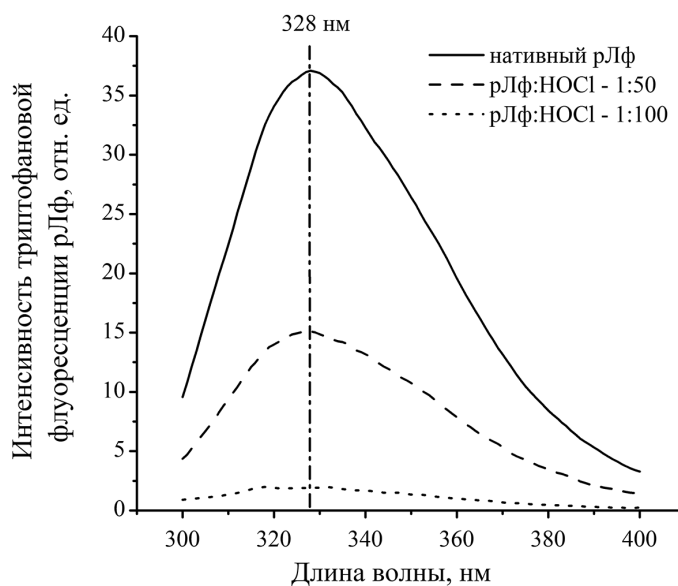


Рис. 1. Спектры собственной триптофановой флуоресценции ($\lambda_{\text{возб}} = 285 \text{ нм}$, $\lambda_{\text{регистр}} = 340 \text{ нм}$) рЛф в нативном состоянии и после модификации НОСІ в различном мольном соотношении рЛф : НОСІ

Fig. 1. Tryptophan emission spectrum ($\lambda_{\text{ex}} = 285 \text{ nm}$, $\lambda_{\text{em}} = 340 \text{ nm}$) of recombinant Lf in native state and after HOCl modification in different mole ratio recombinant Lf : HOCl

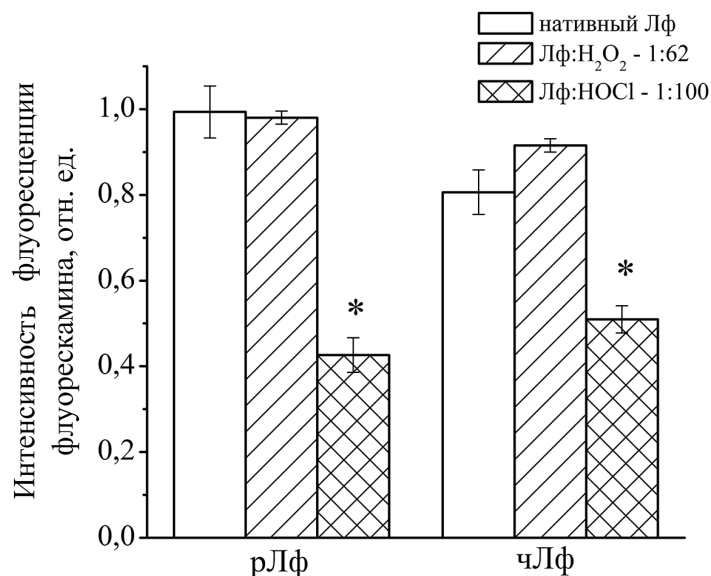


Рис. 2. Изменение интенсивности флуоресценции флуорескамина ($\lambda_{\text{возб}} = 390$ нм, $\lambda_{\text{регистр}} = 490$ нм) при связывании с нативными рЛф и чЛф и белками после их модификации HOCl или H₂O₂.

* – достоверно отличается от интенсивности флуоресценции флуорескамина в растворе нативного Лф ($p < 0,05$)

Fig. 2. Change of fluorescence intensity ($\lambda_{\text{ex}} = 390$ nm, $\lambda_{\text{em}} = 490$ nm)

of fluorescamine binding to native and HOCl or H₂O₂ modified recombinant Lf and human Lf.

* – significantly differ from fluorescence intensity of fluorescamine binding to native Lf ($p < 0,05$)

Как показано на рис. 2, интенсивность флуоресценции флуорескамина, связанного с рЛф, модифицированным HOCl, значительно снижается по сравнению с интенсивностью флуоресценции зонда, связанного с нативным белком, но не изменяется при связывании с рЛф, модифицированным H₂O₂.

Было установлено, что обработка Лф HOCl в мольном соотношении 1 : 100 приводит к снижению интенсивности флуоресценции флуорескамина при связывании с рЛф на $50,6 \pm 5,4$ %, с чЛф – на $35,2 \pm 4,5$ %, т. е. происходит уменьшение числа первичных аминов за счет образования хлораминов. При этом первичные аминокислотные группы рЛф оказались более доступными для HOCl по сравнению с таковыми у чЛф. Обработка белков H₂O₂ не вызвала изменений в интенсивности флуоресценции флуорескамина, связанного с модифицированными белками. Наблюдаемый эффект вызван тем, что основной мишенью действия H₂O₂ являются сульфгидрильные группы [6], а не первичные амины, с которыми связывается флуорескамин.

Модификация аминокислотных остатков белков под действием HOCl, как правило, сопровождается их фрагментацией или агрегацией, что приводит к нарушению биологических свойств [9; 13]. Для установления конформационных изменений Лф был использован зонд АНС, локализуемый в белке в области неполярных аминокислотных остатков. Параметры флуоресценции АНС высокочувствительны к микроокружению флуорофора, поэтому этот зонд используется в качестве индикатора доступности гидрофобных областей белка и его конформационных изменений.

Установлено, что интенсивность флуоресценции зонда АНС, связанного с модифицированными HOCl рЛф и чЛф (в мольном соотношении белок : HOCl, равном 1 : 100), уменьшается соответственно на $66,8 \pm 2,1$ и $69,8 \pm 1,3$ % по сравнению с нативным белком (рис. 3).

Длина волны максимума спектра флуоресценции связанного с белком зонда АНС ($\lambda_{\text{max}} = 506 \pm 1$ нм) претерпевает коротковолновый сдвиг на $\Delta\lambda = 60$ нм по отношению к зонду, не связанному с АНС (данные не представлены), что свидетельствует об уменьшении полярности окружения зонда при связывании с белком. Длина волны максимума спектра флуоресценции зонда АНС, связанного с модифицированным Лф, оставалась такой же как и с нативным белком, что свидетельствует об отсутствии изменения полярности окружения связанного с белком зонда.

Для выяснения характера изменений в молекуле Лф под действием HOCl было проведено сравнительное исследование интенсивности флуоресценции АНС при связывании с нативными

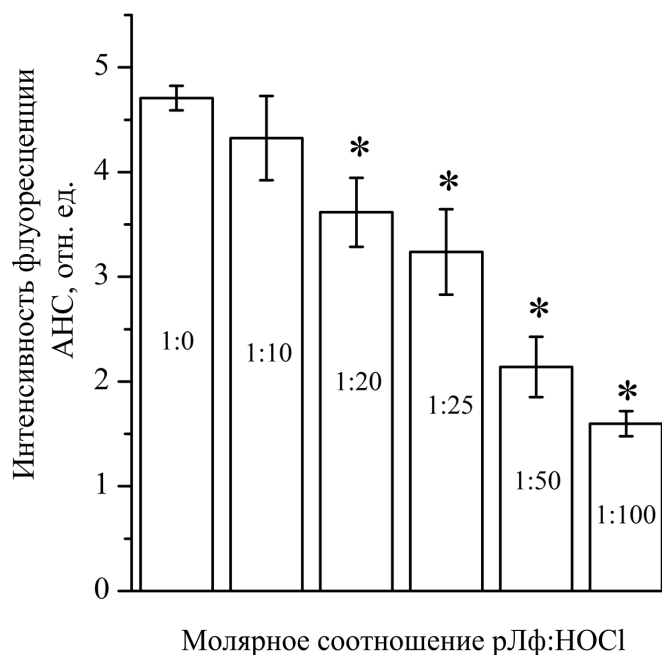


Рис. 3. Изменение интенсивности флуоресценции зонда АНС ($\lambda_{\text{возб}} = 350$ нм, $\lambda_{\text{регистр}} = 510$ нм) при связывании с нативным рЛф и модифицированным НОСІ в различном молярном соотношении белок : НОСІ.
* – достоверно отличается от интенсивности флуоресценции АНС в растворе нативного Лф ($p < 0,05$)

Fig. 3. Change of fluorescence intensity ($\lambda_{\text{ex}} = 350$ nm, $\lambda_{\text{em}} = 510$ nm) of ANS binding to native and HOCl modified recombinant Lf in different mole ratio protein : HOCl.
* – significantly differ from ANS fluorescence intensity binding to native Lf ($p < 0,05$)

и модифицированными НОСІ ЧСА и лизоцимом. Обнаружено, что в растворе ЧСА, модифицированного НОСІ, происходит снижение интенсивности флуоресценции АНС на $84,8 \pm 0,9$ %. Добавление АНС к раствору лизоцима, модифицированного НОСІ, сопровождалось увеличением интенсивности флуоресценции АНС на $22,2 \pm 4,6$ %. Из литературных данных [14] известно, что при действии НОСІ на ЧСА наблюдается разворачивание белковой глобулы, в то же время лизоцим при действии НОСІ агрегирует [15]. Принимая во внимание обнаруженное нами, с одной стороны, снижение интенсивности флуоресценции, а с другой – отсутствие изменения положения максимума флуоресценции АНС (т. е. гидрофобности микроокружения зонда) после его связывания с модифицированной НОСІ молекулой Лф, можно предположить, что модификация приводит к уменьшению объема гидрофобных участков в молекуле Лф, где локализуется АНС. Вероятнее всего, это обусловлено образованием дополнительных гидрофильных групп в результате взаимодействия НОСІ с остатками гидрофобных аминокислот (например, Trp, Tyr, Met и др.), что в конечном итоге может приводить к разворачиванию белковой глобулы аналогично тому, как это показано для ЧСА. Характер конформационных изменений обоих белков (рЛф и чЛф) при модификации их НОСІ оказался сходным.

При действии на Лф H_2O_2 в 62-кратном молярном избытке не наблюдалось уменьшения интенсивности флуоресценции АНС в растворе белка. Полученные результаты свидетельствуют о том, что при добавлении H_2O_2 к Лф не происходит изменения содержания свободных аминогрупп в белке и конформации белковой глобулы Лф.

Модификация состава и структуры белков может отразиться на проявляемых ими специфических свойствах. Главная биологическая функция Лф – способность связывать ионы железа (Fe^{3+}), которая обуславливает наличие бактериостатической, противовоспалительной и антиоксидантной активности белка. Антимикробная активность Лф может проявляться в бактерицидном либо бактериостатическом действии. Первое действие заключается в непосредственном связывании Лф с поверхностью бактерий, что ведет к дестабилизации мембраны и гибели бактерий. Второе действие обусловлено способностью Лф связывать ионы железа из среды, что приводит к ингибированию роста микроорганизмов. Противовоспалительное и антиоксидантное действие Лф

также определяет железосвязывающая способность, поскольку свободные ионы Fe^{3+} будучи восстановленными до Fe^{2+} являются причиной образования токсичных гидроксильных радикалов.

Спектрофотометрическим методом было исследовано изменение железосвязывающей способности Лф после модификации HOCl или H_2O_2 .

Как видно из данных, приведенных на рис. 4, зависимость доза–эффект связывания Fe^{3+} с рЛф имеет вид кривой с насыщением сигмоидного типа (коэффициент корреляции $R^2 = 0,99$), что свидетельствует о кооперативности связывания ионов железа.

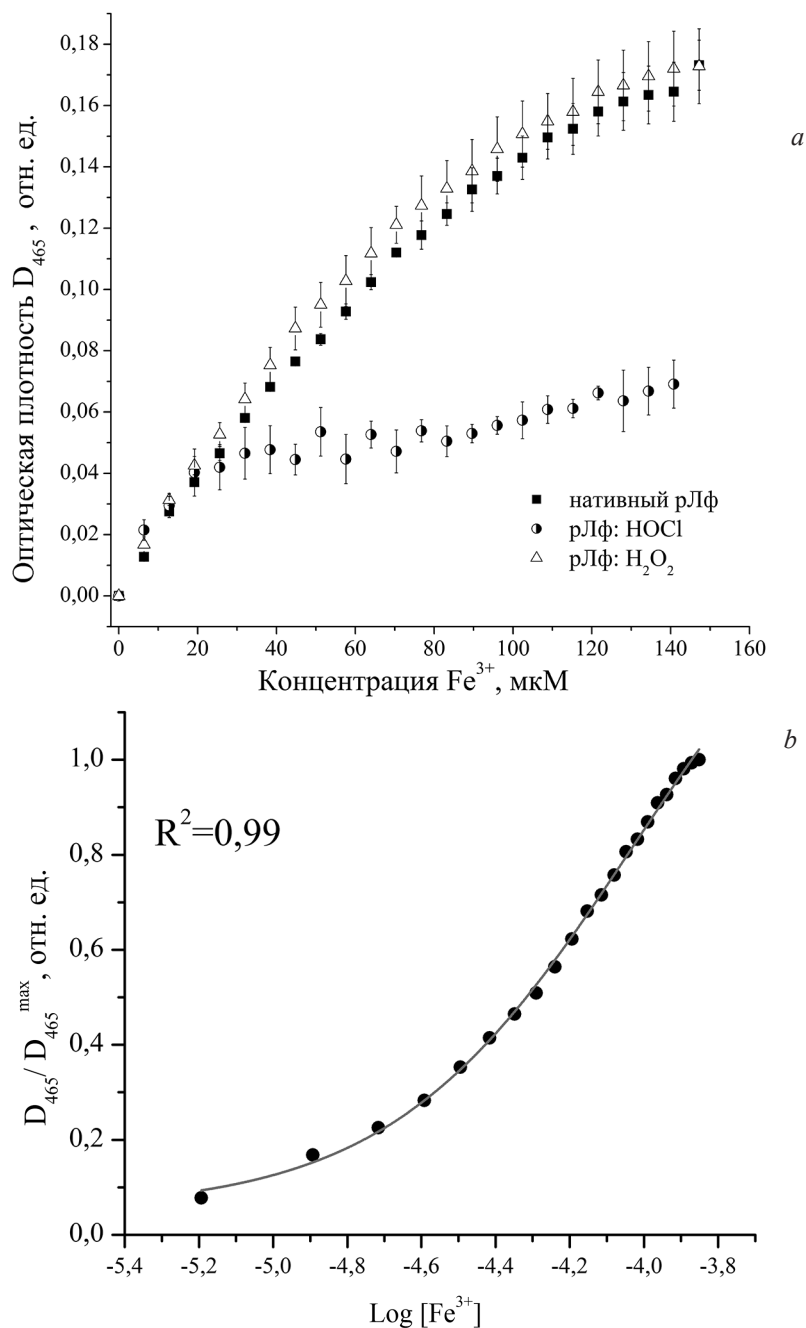


Рис. 4. *a* – кривая доза–эффект, отражающая зависимость оптической плотности раствора рЛф (20 мг/мл) от концентрации связанных ионов железа в случае нативного и модифицированного HOCl или H_2O_2 белка; *b* – аппроксимация кривой доза–эффект функцией «dose-response fit», нормировка проведена на значение оптической плотности при насыщении (D_{465}^{\max})

Fig. 4. *a* – dose–effect curve reflecting dependence optical density of recombinant Lf solution (20 mg/ml) on binding iron ions concentration in case of native and HOCl or H_2O_2 modified protein; *b* – approximation of dose–effect curve by function «dose-response fit», normalization was done to optical density value at saturation (D_{465}^{\max})

В результате действия НОСІ в 100-кратном мольном избытке происходит уменьшение железосвязывающей способности Лф на $61,9 \pm 3,5$ % в случае рЛф и на $70,6 \pm 2,7$ % в случае чЛф, а также потеря кооперативности связывания. Модификация избытком H_2O_2 не приводила к изменениям железосвязывающей способности и кооперативности связывания ионов железа Лф. Оба белка (рЛф и чЛф) продемонстрировали схожую способность связывать ионы железа.

Заключение. Установлено, что физико-химические свойства Лф изменяются при действии НОСІ. При этом в молекуле Лф модифицируется аминокислотный состав (разрушение остатков Trp, модификация остатков Lys) и наблюдаются конформационные перестройки, а также происходит частичная утрата способности белка связывать ионы железа. H_2O_2 не влияет на эти свойства Лф.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 18-515-00004) и Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант Б18Р-058).

Acknowledgements. This work was financially supported by Russian Foundation for Fundamental Research (grant 18-515-00004) and Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (grant Б18Р-058).

Список использованных источников

1. Baker, E. N. Lactoferrin: Molecular structure, binding properties and dynamics of lactoferrin / E. N. Baker, H. M. Baker // *Cellular and Molecular Life Sciences*. – 2005. – Vol. 62, N 22. – P. 2531–2539. <https://doi.org/10.1007/s00018-005-5368-9>
2. Lactoferrin: a modulator of immune and inflammatory responses / D. Legrand [et al.] // *Cellular and Molecular Life Sciences*. – 2005. – Vol. 62, N 22. – P. 2549–2559. <https://doi.org/10.1007/s00018-005-5370-2>
3. Recombinant human lactoferrin modulates neutrophil degranulation and H_2O_2 production via increase of intracellular free calcium ion concentration and tyrosine phosphorylation / D. Grigorieva [et al.] // XIII Intern. Conf. on Lactoferrin Struct., Func. & Appl. – Rome, 2017. – P. 49.
4. Halliwell, B. Hydrogen peroxide in the human body / B. Halliwell, M. V. Clement, L. H. Long // *FEBS Letters*. – 2000. – Vol. 486, N 1. – P. 10–13. [https://doi.org/10.1016/s0014-5793\(00\)02197-9](https://doi.org/10.1016/s0014-5793(00)02197-9)
5. Doing the unexpected: proteins involved in hydrogen peroxide perception / J. Hancock [et al.] // *J. of Exp. Botany*. – 2006. – Vol. 57, N 8. – P. 1711–1718. <https://doi.org/10.1093/jxb/erj180>
6. Watson, A. J. M. Characterisation of oxidative injury to an intestinal cell line (HT-29) by hydrogen peroxide / A. J. M. Watson, J. N. Askew, G. I. Sandle // *Gut*. – 1994. – Vol. 35, N 11. – P. 1575–1581. <https://doi.org/10.1136/gut.35.11.1575>
7. Gugliucci, A. Chlorogenic acid protects paraoxonase 1 activity in high density lipoprotein from inactivation caused by physiological concentrations of hypochlorite / A. Gugliucci, D. H. Markowicz Bastos // *Fitoterapia*. – 2009. – Vol. 80, N 2. – P. 138–142. <https://doi.org/10.1016/j.fitote.2009.01.001>
8. Панасенко, О. М. Хлорноватистая кислота как предшественник свободных радикалов в живых системах / О. М. Панасенко, И. В. Горудко, А. В. Соколов // *Успехи биол. хим.* – 2013. – № 53. – С. 195–244.
9. Davies, M. J. Protein oxidation and peroxidation / M. J. Davies // *Biochem. J.* – 2016. – Vol. 473, N 7. – P. 805–825. <https://doi.org/10.1042/bj20151227>
10. Pattison, D. I. Absolute rate constants for the reaction of hypochlorous acid with protein side chains and peptide bonds / D. I. Pattison, M. J. Davies // *Chem. Res. Toxicol.* – 2001. – Vol. 14, N 10. – P. 1453–1464. <https://doi.org/10.1021/tx0155451>
11. Bhattacharya, M. Studying protein misfolding and aggregation by fluorescence spectroscopy / M. Bhattacharya, S. Mukhopadhyay // *Reviews in Fluorescence 2015*. – Baltimore, 2016. – Ch. 1. – P. 1–28. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24609-3_1
12. Lakowicz, J. R. Principles of fluorescence spectroscopy / J. R. Lakowicz. – Baltimore, 2006. – Ch. 16. – P. 530–578.
13. Veen, B. S. Myeloperoxidase: molecular mechanisms of action and their relevance to human health and disease / B. S. van der Veen, M. P. J. de Winther, P. Heeringa // *Antiox. and redox signaling*. – 2009. – Vol. 11, N 11. – P. 2899–2937. <https://doi.org/10.1089/ars.2009.2538>
14. Structural response of human serum albumin to oxidation: biological buffer to local formation of hypochlorite / A. Del Giudice [et al.] // *The J. of Phys. Chem.* – 2016. – Vol. 120, N 48. – P. 12261–12271. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.6b08601>
15. Petrônio, M. S. Effects of oxidation of lysozyme by hypohalous acids and haloamines on enzymatic activity and aggregation / M. S. Petrônio, V. F. Ximenes // *Biochim. et Biophys. acta*. – 2012. – Vol. 1824, N 10. – P. 1090–1096. <https://doi.org/10.1016/j.bbapap.2012.06.013>

References

1. Baker E. N., Baker H. M. Lactoferrin: Molecular structure, binding properties and dynamics of lactoferrin. *Cellular and Molecular Life Sciences*, 2005, vol. 62, no. 22, pp. 2531–2539. <https://doi.org/10.1007/s00018-005-5368-9>
2. Legrand D., Ellass E., Carpentier M., Mazurier J. Lactoferrin: a modulator of immune and inflammatory responses. *Cellular and Molecular Life Sciences*, 2005, vol. 62, no. 22, pp. 2549–2559. <https://doi.org/10.1007/s00018-005-5370-2>
3. Grigorieva D., Gorudko I., Terekhova M., Cherenkevich S., Semak I., Budevich A., Sokolov A., Vasilyev V. Recombinant human lactoferrin modulates neutrophil degranulation and H_2O_2 production via increase of intracellular free calcium ion concentration and tyrosine phosphorylation. *XIII International Conference on Lactoferrin Structure, Functions & Applications*. Rome, 2017, pp. 49.

4. Halliwell B., Clement M. V., Long L. H. Hydrogen peroxide in the human body. *FEBS Letters*, 2000, vol. 486, no. 1, pp. 10–13. [https://doi.org/10.1016/s0014-5793\(00\)02197-9](https://doi.org/10.1016/s0014-5793(00)02197-9)
5. Hancock J., Desikan R., Harrison J., Bright J., Hooley R., Neill S. Doing the unexpected: proteins involved in hydrogen peroxide perception. *Journal of Experimental Botany*, 2006, vol. 57, no. 8, pp. 1711–1718. <https://doi.org/10.1093/jxb/erj180>
6. Watson A. J. M., Askew J. N., Sandle G. I. Characterisation of oxidative injury to an intestinal cell line (HT-29) by hydrogen peroxide. *Gut*, 1994, vol. 35, no. 11, pp. 1575–1581. <https://doi.org/10.1136/gut.35.11.1575>
7. Gugliucci A., Markowicz Bastos D. H. Chlorogenic acid protects paraoxonase 1 activity in high density lipoprotein from inactivation caused by physiological concentrations of hypochlorite. *Fitoterapia*, 2009, vol. 80, no. 2, pp. 138–142. <https://doi.org/10.1016/j.fitote.2009.01.001>
8. Panasenko O. M., Gorudko I. V., Sokolov A. V. Hypochlorous acid as a precursor of free radicals in living systems. *Biochemistry (Moscow)*, 2013, vol. 78, no. 13, pp. 1466–1489. <https://doi.org/10.1134/s0006297913130075>
9. Davies M. J. Protein oxidation and peroxidation. *Biochemistry Journal*, 2016, vol. 473, no. 7, pp. 805–825. <https://doi.org/10.1042/bj20151227>
10. Pattison D. I., Davies M. J. Absolute rate constants for the reaction of hypochlorous acid with protein side chains and peptide bonds. *Chemical Research in Toxicology*, 2001, vol. 14, no. 10, pp. 1453–1464. <https://doi.org/10.1021/tx0155451>
11. Bhattacharya M., Mukhopadhyay S. Studying protein misfolding and aggregation by fluorescence spectroscopy. *Reviews in Fluorescence 2015*. Baltimore, 2016, ch. 1, pp. 1–28. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24609-3_1
12. Lakowicz J. R. *Principles of fluorescence spectroscopy*. Baltimore, 2006, ch. 16, pp. 530–578. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-3061-6_16
13. Veen B. S., Winther M. P. J., Heeringa P. Myeloperoxidase: molecular mechanisms of action and their relevance to human health and disease. *Antioxidants & Redox Signaling*, 2009, vol. 11, no. 11, pp. 2899–2937. <https://doi.org/10.1089/ars.2009.2538>
14. Giudice A. del, Dicko C., Galantini L., Pavel N. V. Structural response of human serum albumin to oxidation: biological buffer to local formation of hypochlorite. *Journal of Physical Chemistry*, 2016, vol. 120, no. 48, pp. 12261–12271. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.6b08601>
15. Petrônio M. S., Ximenes V. F. Effects of oxidation of lysozyme by hypohalous acids and haloamines on enzymatic activity and aggregation. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – Proteins and Proteomics*, 2012, vol. 1824, no. 10, pp. 1090–1096. <https://doi.org/10.1016/j.bbapap.2012.06.013>

Информация об авторах

Терехова Мария Сергеевна – стажер мл. науч. сотрудника. Белорусский государственный университет (ул. Бобруйская, 5, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: autumn_frost@mail.ru.

Григорьева Дарья Владимировна – канд. биол. наук, ст. науч. сотрудник. Белорусский государственный университет (ул. Бобруйская, 5, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: dargr@tut.by.

Горудко Ирина Владимировна – канд. биол. наук, доцент, вед. науч. сотрудник. Белорусский государственный университет (ул. Бобруйская, 5, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: irinagorudko@gmail.com.

Семак Игорь Викторович – канд. биол. наук, доцент, зав. кафедрой. Белорусский государственный университет (ул. Курчатова, 10, 220045, Минск, Республика Беларусь). E-mail: semak@bsu.by.

Соколов Алексей Викторович – д-р биол. наук, профессор, зав. лабораторией. Институт экспериментальной медицины (ул. Академика Павлова, 12, 197376, Санкт-Петербург, Российская Федерация). E-mail: biochemsokolov@gmail.com.

Панасенко Олег Михайлович – д-р биол. наук, профессор, заведующий лабораторией. Федеральный научно-клинический центр физической-химической медицины ФМБА России (Малая Пироговская ул., 1а, 119435, Москва, Российская Федерация). E-mail: o-panas@mail.ru.

Черенкевич Сергей Николаевич – академик, д-р биол. наук, профессор. Белорусский государственный университет (ул. Бобруйская, 5, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: cherenkevich@bsu.by.

Information about the authors

Terekhova Maria Sergeevna – Trainee of Junior researcher. Belarusian State University (5, Bobruiskaya Str., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: autumn_frost@mail.ru.

Grigorieva Daria Vladimirovna – Ph. D. (Biology), Senior researcher. Belarusian State University (5, Bobruiskaya Str., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dargr@tut.by.

Gorudko Irina Vladimirovna – Ph. D. (Biology), Assistant professor, Leading researcher. Belarusian State University (5, Bobruiskaya Str., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: irinagorudko@gmail.com.

Semak Igor Victorovich – Ph. D. (Biology), Assistant professor, Head of the Department. Belarusian State University (10, Kurchatov Str., 220045, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: semak@bsu.by.

Sokolov Aleksey Victorovich – D. Sc. (Biology), Professor, Head of the Laboratory. Institute of Experimental Medicine (12, Academic Pavlov Str., 197376, Saint-Petersburg, Russian Federation). E-mail: biochemsokolov@gmail.com.

Panasenko Oleg Mikhailovich – D. Sc. (Biology), Professor, Head of the Laboratory. Federal Research and Clinical Center of Physical-Chemical Medicine (1a, Malaya Pirogovskaya Str., 119435, Moscow, Russian Federation). E-mail: o-panas@mail.ru.

Cherenkevich Sergey Nikolaevich – Academician, D. Sc. (Biology), Professor. Belarusian State University (5, Bobruiskaya Str., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: cherenkevich@bsu.by.

ISSN 1561-8323 (Print)

ISSN 2524-2431 (Online)

УДК 614.875:537.872:52-77+599.323.4+591.3:591.463.1

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-2-198-206>

Поступило в редакцию 25.02.2019

Received 25.02.2019

Н. В. Чушова¹, член-корреспондент Ф. И. Висмонт²¹*Институт радиобиологии Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Республика Беларусь*²*Белорусский государственный медицинский университет, Минск, Республика Беларусь***ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЧАСТОТЫ МОБИЛЬНОГО ТЕЛЕФОНА НА МОРФОФУНКЦИОНАЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ РЕПРОДУКТИВНОЙ СИСТЕМЫ КРЫС-САМЦОВ И ИХ ПОТОМСТВА**

Аннотация. В эксперименте были установлены отдаленные последствия влияния низкоинтенсивного электромагнитного излучения от мобильного телефона (ЭМИ МТ 1745 МГц, $\bar{x}_{\text{пд}} = 7,5 \pm 0,3$ мкВт/см²) в потомстве крыс-самцов, рожденных от родителей, один из которых или оба были подвергнуты длительному воздействию исследуемого фактора. Установлено изменение соотношения полов у рожденного потомства и снижение их массы тела. Анализ состояния репродуктивной системы потомства самцов при достижении ими возраста 2 и 4 месяца выявил значительные нарушения, причем наиболее выраженные изменения отмечены у потомства, полученного от обоих облученных родителей или когда облучался только самец. Данные изменения проявляются в нарушении нормального функционирования сперматогенного эпителия, а именно имела место интенсификация начального этапа сперматогенеза при значительном его угнетении на стадии трансформации сперматид. Установлено снижение количества зрелых половых клеток – сперматозоидов и выраженное ухудшение их жизнеспособности, а также усиление секреции тестостерона. Выявленные нарушения в морфофункциональном состоянии репродуктивной системы потомства дают основание говорить о трансгенерационном эффекте воздействия ЭМИ, генерируемого источниками сотовой связи, что может быть фактором, влияющим на снижение мужской фертильности.

Ключевые слова: электромагнитное излучение (ЭМИ), мобильный телефон (МТ), крысы-самцы Wistar, рождаемость, сперматогенез, сперматозоиды, жизнеспособность, тестостерон

Для цитирования. Чушова, Н. В. Влияние длительного воздействия электромагнитного излучения частоты мобильного телефона на морфофункциональное состояние репродуктивной системы крыс-самцов и их потомства / Н. В. Чушова, Ф. И. Висмонт // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2019. – Т. 63, № 2. – С. 198–206. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-2-198-206>

Natalya V. Chushova¹, Corresponding Member Frantisek I. Vismont²¹*Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Republic of Belarus*²*Belarusian State Medical University, Minsk, Republic of Belarus***LONG-TERM EFFECTS OF ELECTROMAGNETIC RADIATION OF THE MOBILE PHONE FREQUENCY ON THE MORPHOFUNCTIONAL STATE OF THE REPRODUCTIVE SYSTEM OF RATS AND MALES AND THEIR OFFSPRING**

Abstract. The experiment established the long-term effects of low-intensity electromagnetic radiation from a mobile phone (EMR MP 1745 MHz, $\bar{x}_{\text{pd}} = 7.5 \pm 0.3$ $\mu\text{W}/\text{cm}^2$) in the offspring of male rats from parents, one of which was either subjected to a prolonged exposure of the investigated factor. A change in the sex ratio of the born offspring and a decrease in their body weight have been established. The analysis of the reproductive system of the offspring of males when they reached the age of 2 and 4 months, revealed significant impairments, with the most pronounced changes found in the offspring obtained from both the irradiated parents or when only the male was irradiated. These changes are manifested in the disruption of the normal functioning of the spermatogenic epithelium, namely, an intensification of the initial stage of spermatogenesis is noted, with a significant inhibition at the stage of spermatid transformation. A decrease in the number of mature germ cells – spermatozoa and a pronounced deterioration of their viability, as well as an increase in testosterone secretion is established. The revealed violations in the morphofunctional state of the reproductive system of the offspring suggest that the trans-generation effect of EMR exposure generated by cellular sources can be considered as a factor affecting the decline in the male fertility.

Keywords: electromagnetic radiation (EMR), mobile phone (MP), male rats Wistar, fertility, spermatogenesis, spermatozoa, viability, testosterone

For citation: Chushova N. V., Vismont F. I. Long-term effects of electromagnetic radiation of the mobile phone frequency on the morphofunctional state of the reproductive system of rats and males and their offspring. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2019, vol. 63, no. 2, pp. 198–206 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-2-198-206>

Введение. В связи с глобальным изменением электромагнитной обстановки на Земле, существенный вклад в которую вносит внедрение подвижной сотовой радиосвязи как источника электромагнитного излучения (ЭМИ), актуальным является вопрос о влиянии данного фактора на здоровье людей, и особенно на развивающийся организм [1; 2]. В ряде исследований установлено, что несмотря на низкую интенсивность этого излучения, воздействие которого носит нетепловой характер, оно обладает высокой биологической активностью и способно вызывать нарушения в кроветворной, эндокринной, иммунной, репродуктивной системах, в нервных структурах головного мозга и рецепторах слухового и вестибулярного анализаторов, а также повышает риск развития онкологических заболеваний мозга [3–5]. В связи с этим в 2011 г. Международное агентство исследования рака ВОЗ (IARC) классифицировало электромагнитное поле (ЭМП) сотовых телефонов как возможный канцерогенный фактор для людей, присвоив ему группу канцерогенной опасности 2В [6].

Особо актуальным является вопрос о влиянии данного вида ЭМИ на состояние репродуктивной системы как мужчин, так и женщин. Иными словами – может ли воздействие ЭМИ от источников мобильной связи на одного или обоих родителей в дальнейшем отразиться на здоровье их потомков, которое зависит от качества генетического материала и репродуктивного здоровья как мужчины, так и женщины. В эпидемиологических исследованиях и в работах на животных была показана высокая чувствительность женской и мужской репродуктивной системы к воздействию ЭМИ мобильного телефона (МТ) [7]. Так, в эксперименте было установлено, что влияние ЭМИ МТ на организм крыс-самцов приводит к снижению количества, жизнеспособности и увеличению аномальных форм сперматозоидов, а также к деструктивным изменениям в семенных канальцах, уменьшению количества клеток Лейдига и нарушению синтеза тестостерона [8]. Выявлено, что длительное воздействие ЭМИ, генерируемого источниками сотовой связи, вызывает у самок крыс уменьшение количества продуцируемых овуляторных фолликулов и приводит к изменению гормонального статуса, что впоследствии сказывается на плодовитости животных [9; 10].

Учитывая современную социальную проблему растущего мужского бесплодия [11], представляет интерес изучение морфофункциональных изменений в мужской репродуктивной системе экспериментальных животных, полученных от родителей, один из которых или оба подвергались длительному воздействию ЭМИ от МТ, что позволит установить чувствительность гонад к воздействию фактору на состояние репродуктивной системы в поколении.

Цель работы – выяснение последствий длительного влияния электромагнитного излучения от мобильного телефона (1745 МГц, 8 ч/день фракциями по 30 мин с интервалом в 5 мин, 90 суток) на организм самцов и самок крыс, при дальнейшем их спаривании с необлученными животными, на рождаемость, распределение по полу полученного поколения, а также на состояние репродуктивной системы потомства крыс-самцов в возрасте 2 и 4 месяца.

Материалы и методы исследования. Исследования выполнены на белых самцах и самках крыс линии Вистар возрастом 52–54 дня и массой ♂♂ – $158,1 \pm 3,7$; ♀♀ – $142,5 \pm 4,0$ г на начало эксперимента. Животные 24 самца и 24 самки были разделены на две группы:

1. 12 самок и 12 самцов, не подвергавшиеся облучению;
2. 12 самок и 12 самцов, подвергавшиеся воздействию излучения ЭМП от МТ на протяжении трех месяцев.

Далее облученных и необлученных самцов и самок спаривали в соотношении 1 : 1 в следующих комбинациях:

1. Необлученные самки с необлученными самцами (группа контроля);
2. Облученные самки с облученными самцами;
3. Необлученные самки с облученными самцами;
4. Облученные самки с необлученными самцами.

В каждой группе использовали по 6 животных одного пола. От самок в дальнейшем получали потомство, количество которого учитывали для каждой самки. У полученного поколения в возрасте 1 месяц определяли количество самцов и самок и массу их тела. Изучение морфофункционального состояния репродуктивной системы рожденных крыс-самцов проводили при достижении ими возраста 2 и 4 месяца.

При достижении потомством определенного возраста самцов декапитировали, собирали кровь, а также выделяли семенники, эпидидимисы и семенные пузырьки. В сыворотке крови определяли содержание тестостерона методом иммуноферментного анализа (Хема-Медика, РФ) на микропланшетном фотометре TECAN SAFEIRE (Австралия). Массу репродуктивных органов измеряли на аналитических весах (Ohaus EX, Switzerland, с точностью 0,1 мг) – абсолютная масса семенников, эпидидимисов и семенных пузырьков (АМС, АМЭ, АМСП) с последующим расчетом их относительной массы (ОМ).

Левый семенник освобождали от туники и кровеносных сосудов, получали суспензию сперматогенных клеток как описано в [12]. Определение их количества проводили методом проточной цитометрии (Cytomics FC 500, Beckman Coulter, США). Различные типы половых клеток, которые были выявлены основываясь на соответствующей интенсивности флуоресценции, содержащейся в них ДНК, были обозначены как «С» значения, в качестве диплоидного стандарта использовали лейкоциты периферической крови. По содержанию ДНК клетки были классифицированы как сперматогонии (2С), прелептотенные сперматоциты (сперматоциты в S-фазе), сперматоциты I порядка (4С), круглые (1С), удлинённые (НС1) и продолговатые сперматиды (НС2). Расчитывали индекс сперматогенеза как соотношение клеток постмейотической фазы (2С) к премейотическим (1С), который показывает общую кинетику превращения сперматогенных клеток – от сперматогониальных к круглым сперматидам.

Количество сперматозоидов, выделенных из эпидидимиса, подсчитывали в камере Горяева и оценивали их жизнеспособность методом суправитального окрашивания эозин-нигрозином [13; 14].

Все животные содержались в одинаковых стандартных (с обеспечением температурного, светового режима, полноценного питания, свободного доступа к воде, защиты от инфекций, шума и других помех окружающей среды) условиях вивария Института радиобиологии НАН Беларуси, установленных согласно «Стандартным правилам по упорядочению, оборудованию и содержанию экспериментальных биологических клиник (вивариев)».

Исследования выполнены в соответствии с этическими нормами обращения с животными с соблюдением рекомендаций и требований «Европейской конвенции по защите экспериментальных животных» (Страсбург, 86/609/ЕЕС от 24.11.1986), Хельсинской декларации Всемирной медицинской ассоциации о гуманном обращении с животными (1996) и ТКП 125–2008 «Надлежащая лабораторная практика», утвержденными постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь (№ 56 от 28.03.2008).

Источником ЭМИ являлся МТ распространенной марки, подключенный к компьютеру с сервисной программой WinTesla, позволяющей управлять его работой. Условия облучения животных: несущая частота 1745 МГц, 8 ч/день, фракциями по 30 мин с интервалом в 5 мин, в режиме имитации разговора, т. е. излучение, близкое по своим характеристикам к ЭМИ МТ, действующему на пользователя стандарта GSM при разговоре. Телефон размещался в центральной части рабочей зоны ($1 \times 0,7$ м), в которой находились 4 пластиковые клетки с животными. Плотность потока электромагнитной энергии в клетке измерялась прибором ПЗ-41 и находилась в пределах $0,2\text{--}20,0$ мкВт/см² (в зависимости от удаленности от антенны МТ), составляя в среднем $7,5 \pm 0,3$ мкВт/см².

Полученные данные обрабатывали общепринятыми методами биологической статистики, используя пакеты программ Excel и GraphPad Prism 5. В качестве критерия однородности применялся однофакторный дисперсионный анализ one-way ANOVA. Для сравнения конкретных дисперсионных комплексов использовали критерий Тьюки (Tukey's test). Различия считали статистически значимыми при вероятности ошибки менее 5 % ($p < 0,05$).

Результаты и их обсуждение. В эксперименте нами не было выявлено значимых изменений в рождаемости потомства, оцениваемых по количеству родившегося помета на одну родившую самку, полученного от родителей один из которых или оба подвергались длительному воздействию ЭМИ от МТ. Тем не менее, необходимо отметить незначительное снижение помета в группах, где облучался лишь самец, что составляет $9,20 \pm 1,16$ и только самка – $9,33 \pm 2,03$ при сравнении с группой необлученных родителей – $10,00 \pm 1,22$, но данное снижение не было статисти-

чески значимым (табл. 1). И напротив, обнаружено увеличение количества рожденного помета у облученных самок, спаренных с облученными самцами, которое составляло $10,33 \pm 0,33$ детеныша на одну самку.

Т а б л и ц а 1. Рождаемость, распределение по полу и масса тела потомства, полученных от родителей, один из которых или оба были подвергнуты воздействию ЭМИ от МТ

Table 1. Fertility, distribution by sex and body weight of animals obtained from parents exposed to EMR from MP with their further mating in combination with non-irradiated animals

Группа животных Group of animals	Среднее количество детенышей на самку Mean number of kids per female	Рождаемость, % к контролю от родивших самок Birth rate, % to the control from born females	Соотношение полов Sex ratio	Масса тела, г в возрасте 1 месяц Body mass, g at an age of 1 month	
			♂:♀	♂	♀
необл♀ × необл♂	10,00 ± 1,22	100,0	0,9	83,00 ± 2,81	81,73 ± 3,15
обл♀ × обл♂	10,33 ± 0,33	103,33	1,2	72,82 ± 1,60*	68,50 ± 1,22*
необл♀ × обл♂	9,20 ± 1,16	92,00	1,3	79,38 ± 1,87	75,61 ± 2,16
обл♀ × необл♂	9,33 ± 2,03	93,33	0,6	76,22 ± 2,72	76,50 ± 3,05

Примечание: * – статистически значимые различия к группе животных, рожденных от необлученных родителей при $p \leq 0,05$.

Note: * – statistically significant differences to the group of animals born from unirradiated parents at $p \leq 0.05$.

Ранее в эксперименте нами было установлено статистически значимое снижение рождаемости на 28,5 % у самок, подвергнутых влиянию ЭМИ МТ (1745 МГц, $\bar{x}_{\text{ДПЭ}} = 7,5 \pm 0,3$ мкВт/см²) на протяжении трех месяцев и спаренных с облученными самцами. Но в данной модели самки продолжали облучаться на протяжении всего срока беременности [15]. В связи с чем было основание полагать, что воздействие ЭМИ от МТ в антенатальный период развития является существенным фактором при закладке и развитии эмбриона.

Наиболее важным фактом, свидетельствующим о негативном влиянии низкоинтенсивного ЭМИ МТ на организм экспериментальных животных в период их постнатального развития, было изменение соотношения полов у рожденного потомства. А именно, воздействие ЭМИ от МТ как на обоих родителей, так и только на самцов приводило к увеличению доли самцов у рожденного потомства и составляло 1,2 и 1,3 соответственно, и напротив, в группе необлученных животных и где облучалась только самка данный коэффициент составлял 0,9 и 0,6 соответственно, что указывает на превышение количества рожденных самок над самцами (табл. 1).

Обнаружено, что масса тела самцов и самок полученного потомства в возрасте 1 месяц имеет тенденцию к снижению в группах, где облучался один из родителей, а статистически значимое снижение данного параметра выявлено у детенышей, рожденных от обоих облученных родителей, что составляет 87,7 и 83,8 % ($p < 0,05$) для самцов и самок соответственно по отношению к необлученной группе животных (табл. 1).

Масса тела рожденных крыс-самцов в 2-месячном возрасте не достигала контрольного значения и оставалась сниженной, но более значительное падение массы тела имело место у потомства, рожденного от обоих облученных родителей, что составляло 90,4 % ($p < 0,05$) (табл. 2). У данной группы потомства выявлено также снижение абсолютной массы семенников и эпидидимисов на 7,2 и 7,1 % ($p < 0,05$) и статистически значимое увеличение относительной массы семенных пузырьков на 18,8 % соответственно при сравнении с группой потомков, полученных от необлученных родителей. Выявленные изменения для данной группы животных обнаружены и при достижении ими 4-месячного возраста. А именно, абсолютная масса семенников была снижена на 5,0 % ($p < 0,05$), а относительная масса семенных пузырьков превышала контрольное значение на 8,8 % ($p < 0,05$).

Установлено статистически значимое снижение относительной массы семенников у 4-месячного потомства, полученного от родителей в группах, где облучался один из родителей на 5,9 и 9,9 % соответственно ($p < 0,05$). Прослеживаемая тенденция в увеличении массы семенных пузырьков у потомства в 2-месячном возрасте сохранилась у 4-месячных животных, рожденных от обоих облученных родителей (на 8,8 %, $p < 0,05$), и в группе где экспозиции в ЭМП подвергалась только самка (18,6 %, $p < 0,05$).

Т а б л и ц а 2. Масса тела и органов репродуктивной системы крыс-самцов в возрасте 2 и 4 месяца, полученных от родителей, один из которых или оба были подвергнуты воздействию ЭМИ от МТ (1745 МГц)

T a b l e 2. Body mass and reproductive system organs of male rats at the age of 2 and 4 months received from parents, one of which or both were exposed to EMR from MP (1745 MHz)

Массовые показатели Mass indices	Группы животных Groups of animals			
	необл♀×необл♂	обл♀×обл♂	необл♀×обл♂	обл♀×необл♂
<i>2 месяца</i>				
Масса тела	218,86 ± 8,27	197,71 ± 1,43*	203,00 ± 2,98	210,00 ± 8,67
АМС, г	1,38 ± 0,03	1,28 ± 0,01*	1,41 ± 0,07	1,30 ± 0,04
ОМС, г	0,63 ± 0,02	0,65 ± 0,01	0,69 ± 0,03	0,62 ± 0,01
АМЭ, г	0,28 ± 0,01	0,26 ± 0,002*	0,28 ± 0,02	0,26 ± 0,01
ОМЭ, г	0,13 ± 0,003	0,13 ± 0,001	0,14 ± 0,01	0,12 ± 0,002
АМСП, г	0,35 ± 0,02	0,38 ± 0,01	0,34 ± 0,03	0,37 ± 0,03
ОМСП, %	0,16 ± 0,01	0,19 ± 0,01*	0,17 ± 0,01	0,18 ± 0,01
<i>4 месяца</i>				
Масса тела	333,86 ± 6,71	326,17 ± 7,48	337,86 ± 9,06	364,25 ± 10,31
АМС, г	1,69 ± 0,02	1,61 ± 0,03*	1,62 ± 0,06	1,69 ± 0,06
ОМС, г	0,51 ± 0,01	0,49 ± 0,01	0,48 ± 0,01*	0,46 ± 0,004*
АМЭ, г	0,55 ± 0,01	0,54 ± 0,01	0,55 ± 0,02	0,57 ± 0,02
ОМЭ, г	0,17 ± 0,003	0,17 ± 0,004	0,16 ± 0,003	0,16 ± 0,002
АМСП, г	1,13 ± 0,02	1,20 ± 0,04	1,09 ± 0,04	1,34 ± 0,05*
ОМСП, %	0,34 ± 0,01	0,37 ± 0,01*	0,32 ± 0,01	0,37 ± 0,02

П р и м е ч а н и е: * – статистически значимые различия к группе животных, рожденных от необлученных родителей при $p \leq 0,05$.

N o t e: * – statistically significant differences to the group of animals born from unirradiated parents at $p \leq 0.05$.

Выявленные особенности изменений в распределении сперматогенных клеток различных популяций указывают на различную реакцию сперматогенного эпителия у поколения самцов крыс, которая зависит от того один или оба родителя были подвергнуты длительному воздействию ЭМИ от МТ (рис. 1). Наиболее выраженные изменения выявлены у потомства, полученного от обоих облученных родителей, и когда облучался только самец. Так, в группе, где были облучены оба родителя у потомства в 2-месячном возрасте установлено увеличение количества клеток начального звена сперматогенеза – сперматогоний (2С) и сперматоцит в S-фазе на 12,5 и 14,6 % ($p < 0,05$), и снижение количества удлинённых сперматид на 18,78 % ($p < 0,05$), что характеризует угнетение дифференцировки клеток завершающего этапа сперматогенеза. Более выраженное нарушение дифференцировки сперматид обнаружено у потомства, полученного от необлученной самки и облученного самца, на что указывает статистически значимое снижение количества круглых и удлинённых клеток на 12,31 и 29,2 % соответственно, при значительном на 36,0 % увеличении числа продолговатых сперматид. Близкие изменения в распределении клеток сперматогенного эпителия были выявлены и в группе, где облучалась только самка.

Восстановление нормального функционирования сперматогенного эпителия потомства крыс-самцов в отдаленном периоде – 4 месяца не происходило и наиболее значительные изменения обнаружены у потомков самцов, рожденных от обоих облученных родителей. Так, при установленной активации пролиферирующей активности эпителия, проявляемой увеличением количества сперматогоний на 16,6 % ($p < 0,05$), обнаружено снижение сперматоцит I порядка, а также круглых сперматид на 20,4 и 9,1 % ($p < 0,05$) соответственно при сравнении с группой животных, полученных от необлученных родителей.

При расчете индекса сперматогенеза, который отражает полный переход от сперматогоний (2С) к круглым сперматидам (1С), нами было выявлено его снижение, прослеживаемое во всех экспериментальных группах рожденного потомства, но наиболее значительное снижение обнаружено у потомства в возрасте 2 (на 16,3 %, $p < 0,05$) и 4 (на 21,2 %, $p < 0,05$) месяца, рожденного от обоих облученных родителей (рис. 1).

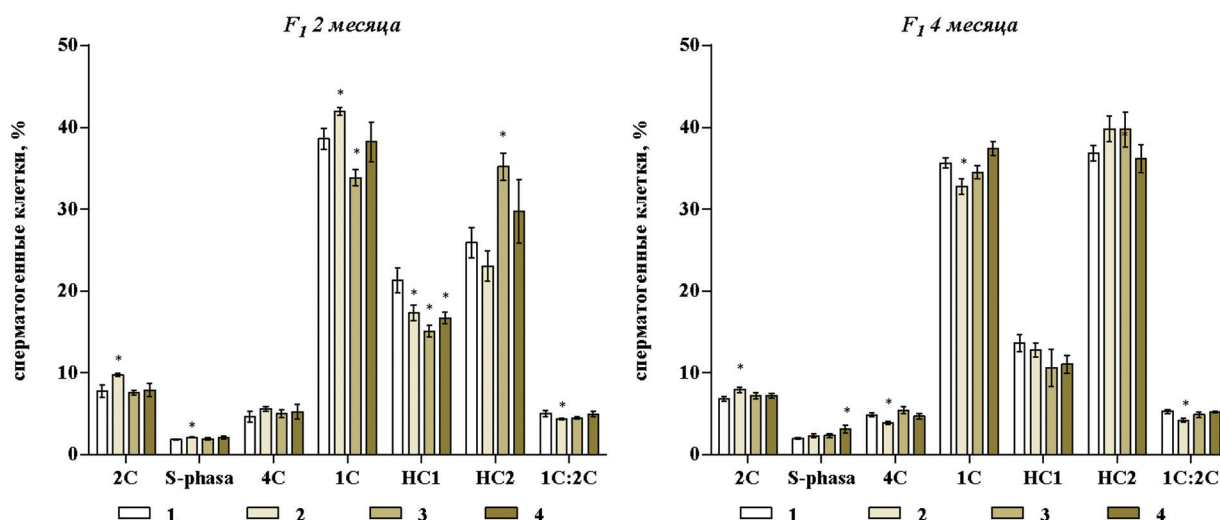


Рис. 1. Распределение клеток сперматогенного эпителия крыс-самцов в возрасте 2 и 4 месяца, полученных от родителей (группы 1–4), один из которых или оба были подвергнуты длительному воздействию ЭМИ от МТ (1745 МГц).

* – статистически значимые различия к группе животных, рожденных от необлученных родителей (группа 1), $p \leq 0,05$

Fig. 1. The distribution of spermatogenic epithelium cells in male rats aged 2 and 4 months, obtained from parents (group 1–4), one of which or both were subjected to prolonged exposure to EMR from MP (1745 MHz).

* – statistically significant differences to the group of animals born from unirradiated parents (group 1), $p \leq 0,05$

Воздействие низкоинтенсивного ЭМИ от МТ на организм самцов и самок крыс в период их постнатального развития в дальнейшем негативно сказывалось на продукции и жизнеспособности сперматозоидов у крыс-самцов полученного потомства. Так, установлено снижение количества сперматозоидов у крыс-самцов в 2-месячном возрасте, полученных при спаривании необлученной самки и облученного самца, – на 13,7 % ($p < 0,05$) и облученной самки и необлученного самца – на 30,4 % ($p < 0,05$). Снижение продукции сперматозоидов сохранялось и у 4-месячных животных, но статистически значимо только у потомков, полученных от облученной самки и облученного самца, на 14,5 % и от необлученной самки и облученного самца – на 11,1 % (рис. 2).

Обнаружено статистически значимое снижение жизнеспособности эпидидимальных сперматозоидов у потомства крыс-самцов в 2-месячном возрасте во всех экспериментальных группах на 12,4, 16,2 и 18,4 % соответственно при сравнении с группой животных, полученных от необлученных родителей. В отдаленном периоде – 4 месяца, сохранялась тенденция в снижении жизнеспособности сперматозоидов, что свидетельствует о высокой биологической активности и об отдаленных эффектах влияния исследуемого фактора (рис. 2).

При изучении андрогенного статуса полученного потомства по содержанию тестостерона в сыворотке крови необходимо отметить выраженную тенденцию в увеличении его концентрации, но статистически значимое лишь у 2- и 4-месячных животных (на 292,7 и 103,0 %, $p < 0,05$), рожденных соответственно от необлученной самки и облученного самца и от облученной самки и необлученного самца (рис. 2).

Таким образом, в эксперименте был выявлен ряд изменений в морфофункциональном состоянии репродуктивной системы крыс-самцов, полученных от родителей, один из которых или оба были подвергнуты длительному воздействию ЭМИ от МТ в период их постнатального развития, что свидетельствует о развитии отдаленных (трансгенерационных) последствий данного воздействующего фактора в поколении. Состояние репродуктивной системы имеет определяющее значение для оценки влияния электромагнитных полей на организм, поскольку данная система находится под непосредственным контролем нейроэндокринной регуляции и ее неспецифическая реакция сигнализирует о нарушении гомеостаза всего организма. Считается, что энергия ЭМИ от мобильного телефона не достаточна для того, чтобы вызвать прямые нарушения в клетках и ДНК, но способна вызывать деполяризацию клеточной мембраны, что приводит к нарушению ее функциональной целостности и как результат избыточному образованию свободных радикалов

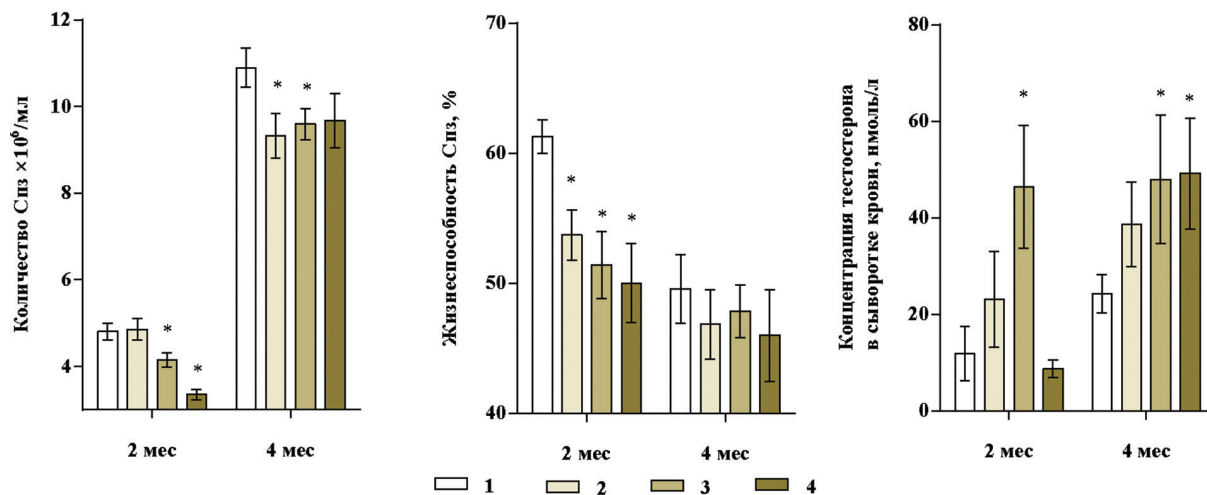


Рис. 2. Количество, жизнеспособность эпидидимальных сперматозоидов (Спз), а также концентрация тестостерона в сыворотке крови крыс-самцов в возрасте 2 и 4 месяца, полученных от родителей (группы 1–4), один из которых или оба были подвергнуты длительному воздействию ЭМИ от МТ (1745 МГц).

* – статистически значимые различия к группе животных, рожденных от необлученных родителей (группа 1), $p \leq 0,05$

Fig. 2. The number, viability of epididymal spermatozoa, as well as serum blood testosterone concentration in male rats aged 2 and 4 months, obtained from parents (group 1–4), one of which or both were subjected to prolonged exposure to EMR from MP (1745 MHz).

* – statistically significant differences to the group of animals born from unirradiated parents (group 1), $p \leq 0.05$

в клетке, которые вызывают повреждения клеточных компонентов – липидов, ДНК и белков [1; 2]. Поскольку взаимодействие биологических объектов с факторами окружающей среды реализуется благодаря генетически детерминированным процессам пролиферации и дифференцировки клеток и контролируемого обновления их популяций, выявление нарушений в репродуктивных клетках является несомненно важным показателем ранней диагностики патологий.

Заключение. Таким образом, длительное воздействие низкоинтенсивного ЭМИ от МТ на организм самцов и самок крыс в период их постнатального развития и дальнейшее их спаривание с необлученными и облученными животными приводит к изменению соотношения полов у полученного потомства и снижению их массы тела. Результаты исследований свидетельствуют об отдаленных эффектах влияния исследуемого фактора на состояние репродуктивной системы крыс-самцов потомков, причем наиболее выраженные изменения выявлены у потомства, полученного от обоих облученных родителей или когда облучался только самец. Данные изменения проявляются в нарушении нормального функционирования сперматогенного эпителия, а именно отмечается интенсификация начального этапа сперматогенеза при значительном его угнетении на стадии трансформации сперматид. Одновременно установлено снижение количества зрелых половых клеток – сперматозоидов и выраженное ухудшение их жизнеспособности, а также интенсификация секреции тестостерона у потомства крыс-самцов.

Выявленные особенности изменений в морфофункциональном состоянии репродуктивной системы полученного потомства крыс-самцов дают основание полагать, что низкоинтенсивное электромагнитное излучение от мобильного телефона способно вызывать трансгенерационные изменения и является фактором, приводящим к угнетению генеративной функции в поколении.

Список использованных источников

1. Стожаров, А. Н. Медицинская экология / А. Н. Стожаров. – Минск, 2007. – 368 с.
2. Гичев, Ю. П. Влияние электромагнитных полей на здоровье человека / Ю. П. Гичев, Ю. Ю. Гичев. – Новосибирск, 1999. – 90 с.
3. Григорьев, Ю. Г. Сотовая связь и здоровье: электромагнитная обстановка, радиобиологические и гигиенические проблемы, прогноз опасности / Ю. Г. Григорьев, О. А. Григорьев. – М., 2016. – 574 с.
4. Хорсева, Н. И. Влияние низкоинтенсивных электромагнитных полей на антенатальный период развития организма. Часть 1: от гаметогенеза до родов (обзор) / Н. И. Хорсева, Ю. Г. Григорьев, П. Е. Григорьев // Журн. мед.-биол. исследований. – 2017. – Т. 5, № 4. – С. 42–54. <https://doi.org/10.17238/issn2542-1298.2017.5.4.42>

5. Case-control study of the association between malignant brain tumours diagnosed between 2007 and 2009 and mobile and cordless phone use / L. Hardell [et al.] // *Int. J. Oncol.* – 2013. – Vol. 43, N 6. – P. 1833–1845. <https://doi.org/10.3892/ijo.2013.2111>
6. IARC classifies radiofrequency electromagnetic fields as possibly carcinogenic to humans [Electronic Resource]: Press Release N 208, 31 May 2011 / World Health Organization. – Mode of access: https://www.iarc.fr/wp-content/uploads/2018/07/pr208_E.pdf. – Date of access: 25.02.2019.
7. Верещако, Г. Г. Влияние электромагнитного излучения мобильных телефонов на состояние мужской репродуктивной системы и потомство / Г. Г. Верещако. – Минск, 2015. – 186 с.
8. Effect of mobile telephones on sperm quality: a systematic review and meta-analysis / J. A. Adams [et al.] // *Environ. Int.* – 2014. – Vol. 70. – P. 106–112. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.04.015>
9. The effects of electromagnetic fields on the number of ovarian primordial follicles: An experimental study / M. Bakacak [et al.] // *Med. Sci.* – 2015. – Vol. 31, N 6. – P. 287–292. <https://doi.org/10.1016/j.kjms.2015.03.004>
10. Different periods of intrauterine exposure to electromagnetic field: Influence on female rats fertility, prenatal and postnatal development / Ali S. H. Alchalabi [et al.] // *Asian Pacific J. Reprod.* – 2016. – Vol. 5, N 1. – P. 14–23. <https://doi.org/10.1016/j.apjr.2015.12.003>
11. Brody, S. A. Мужское бесплодие и окислительный стресс: роль диеты, образа жизни и пищевых добавок / S. A. Brody // *Андрология и генитальная хирургия.* – 2014. – Т. 15, № 3. – С. 33–41.
12. Suresh, R. Quantitation of spermatogenesis by DNA flow cytometry: comparative study among six species of mammals / R. Suresh, G. R. Aravindan, N. R. Moudgal // *J. Biosci.* – 1992. – Vol. 17, N 4. – P. 413–419. <https://doi.org/10.1007/bf02720096>
13. World Health Organization. WHO laboratory manual for the examination and processing of human semen. – 5th ed. – Geneva, 2010. – P. 26–28.
14. Влияние радиационного облучения на витаминный статус и сперматогенез крыс / В. В. Евдокимов [и др.] // *Бюл. экп. биол. и мед.* – 1997. – Т. 123, № 5. – С. 524–527.
15. Григорьев, Ю. Г. Состояние репродуктивной системы крыс-самцов в ряду поколений, полученных от облученных родителей и подвергнутых электромагнитному воздействию от мобильного телефона / Ю. Г. Григорьев, Н. В. Чуешова, Г. Г. Верещако // *Мед. радиол. и радиац. безопасность.* – 2018. – Т. 63, № 5. – С. 33–40.

References

1. Stozharov A. N. *Medical ecology*. Minsk, 2007. 368 p. (in Russian).
2. Gichev Yu. P., Gichev Yu. Yu. *The influence of electromagnetic fields on human health*. Novosibirsk, 1999. 90 p. (in Russian).
3. Grigor'ev Yu. G., Grigor'ev O. A. *Cellular communications and health: electromagnetic environment, radiobiological and hygienic problems, hazard prediction*. Moscow, 2016. 574 p. (in Russian).
4. Khorseva N. I., Grigor'ev Yu. G., Grigor'ev P. E. Influence of low-intensity electromagnetic fields on the organisms' antenatal development. Part 1. From Gametogenesis to Birth (Review). *Journal of Medical and Biological Research*, 2017, vol. 5, no. 4, pp. 42–54. <https://doi.org/10.17238/issn2542-1298.2017.5.4.42> (in Russian).
5. Hardell L., Carlberg M., Söderqvist F., Mild K. H. Case-control study of the association between malignant brain tumours diagnosed between 2007 and 2009 and mobile and cordless phone use. *International Journal of Oncology*, 2013, vol. 43, no. 6, pp. 1833–1845. <https://doi.org/10.3892/ijo.2013.2111>
6. World Health Organization. IARC classifies radiofrequency electromagnetic fields as possibly carcinogenic to humans. Press Release N 208, 31 May 2011. Available at: https://www.iarc.fr/wp-content/uploads/2018/07/pr208_E.pdf (accessed 25 February 2019).
7. Vereshchako G. G. *Influence of electromagnetic radiation of mobile phones on the state of male reproductive system and offspring*. Minsk, 2015. 186 p. (in Russian).
8. Adams J. A., Galloway T. S., Mondal D., Esteves S. C., Mathews F. Effect of mobile telephones on sperm quality: a systematic review and meta-analysis. *Environment International*, 2014, vol. 70, pp. 106–112. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.04.015>
9. Bakacak M., Bostanci M. S., Attar R., Yildirim Ö. K., Yildirim G., Bakacak Z., Sayar H., Han A. The effects of electromagnetic fields on the number of ovarian primordial follicles: An experimental study. *The Kaohsiung Journal of Medical Sciences*, 2015, vol. 31, no. 6, pp. 287–292. <https://doi.org/10.1016/j.kjms.2015.03.004>
10. Alchalabi Ali S. H., Aklilu E., Aziz Abd R., Malek F., Ronald S. H., Khan M. A. Different periods of intrauterine exposure to electromagnetic field: Influence on female rats' fertility, prenatal and postnatal development. *Asian Pacific Journal of Reproduction*, 2016, vol. 5, no. 1, pp. 14–23. <https://doi.org/10.1016/j.apjr.2015.12.003>
11. Brody S. A. Male factor infertility and oxidative stress: role of diet, lifestyle and nutritional supplements. *Andrologiya i genital'naya hirurgiya = Andrology and Genital Surgery*, 2014, vol. 15, no. 3, pp. 33–41 (in Russian).
12. Suresh R., Aravindan G. R., Moudgal N. R. Quantitation of spermatogenesis by DNA flow cytometry: comparative study among six species of mammals. *Journal of Biosciences*, 1992, vol. 17, no. 4, pp. 413–419. <https://doi.org/10.1007/bf02720096>
13. World Health Organization. WHO laboratory manual for the examination and processing of human semen. 5th ed. Geneva, 2010, pp. 26–28.
14. Evdokimov V. V., Kodentsova V. M., Vrzhesinskaya O. A., Yakushina L. M., Erasova V. I., Kirpatovsiky V. I., Sakharov I. Y. Influence of radiation on vitamin status and spermatogenesis in rats. *Byulleten' Eksperimental'noi Biologii i Meditsiny = Bulletin of Experimental Biology and Medicine*, 1997, vol. 123, no. 5, pp. 524–527 (in Russian).

15. Grigoriev Yu. G., Chueshova N. V., Vereschako G. G. Reproductive system state among generations of male rats, obtained from irradiated parents and subjected to electromagnetic interference from mobile phone (1745 MHz). *Medical Radiology and Radiation Safety*, 2018, vol. 63, no. 5, pp. 33–40. https://doi.org/10.12737/article_5bc89628800007.23290426

Информация об авторах

Чуешова Наталья Владимировна – науч. сотрудник. Институт радиобиологии НАН Беларуси (ул. Федюнинского, 4, 246007, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: natalya-chueshova@tut.by.

Висмонт Франтишек Иванович – член-корреспондент, д-р мед. наук, профессор, заведующий кафедрой. Белорусский государственный медицинский университет (пр. Дзержинского, 83, 220116, Минск, Республика Беларусь). E-mail: patfiz@bsmu.by.

Information about the authors

Chueshova Natalya Vladimirovna – Researcher. Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus (4, Fedyninski Str., 246007, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: natalya-chueshova@tut.by.

Vismont Frantisek Ivanovich – Corresponding Member, D. Sc. (Medicine), Professor, Head of the Department. Belarusian State Medical University (83, Dzerzhinski Ave., 220116, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: patfiz@bsmu.by.

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

МЕДИЦИНА
MEDICINE

УДК 616.441-006.6-085.357:616.15
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-2-207-215>

Поступило в редакцию 10.09.2018
Received 10.09.2018

Т. А. Митюкова¹, Т. А. Леонова², С. Б. Кохан¹, А. А. Сиваков³, О. Е. Полулях¹

¹*Институт физиологии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь*

²*Минский городской онкологический диспансер, Минск, Республика Беларусь*

³*Белорусская медицинская академия последипломного образования, Минск, Республика Беларусь*

**ВЛИЯНИЕ СУПРЕССИВНОЙ ТЕРАПИИ ЛЕВОТИРОКСИНОМ НАТРИЯ
НА СОСТОЯНИЕ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ
И СИМПАТОАДРЕНАЛОВОЙ СИСТЕМ**

(Представлено членом-корреспондентом В. В. Солтановым)

Аннотация. Гормоны щитовидной железы могут влиять на сердечно-сосудистую систему непосредственно – путем связывания с ядерными тиреоидными рецепторами, а также опосредованно – изменяя нейро-гуморальный статус организма в целом. Цель работы – оценить влияние супрессивной терапии левотироксином на регуляцию сердечного ритма и активность симпатoadренальной системы, а также уровень кортизола в крови у молодых пациентов с тиреоидным раком. Показано, что влияние супрессивной терапии левотироксином на состояние сердечно-сосудистой системы проявляется в нарастании риска тахикардии и в изменениях вариабельности сердечного ритма, взаимосвязанных с индексом массы тела. У пациентов с тиреоидным раком отмечалось резкое снижение норметанефрина (метаболита норадреналина) в моче. Уровень метанефрина (метаболита адреналина) и дофамина в моче зависел от тонуса вегетативной нервной системы и артериального давления. Выявленные сдвиги свидетельствуют о том, что на фоне субклинического гипертиреоза включаются механизмы, направленные на стабилизацию сердечного ритма и предупреждение эффектов гиперстимуляции тиреоидных и бета-адренорецепторов миокарда.

Ключевые слова: супрессивная терапия левотироксином, сердечно-сосудистая система, симпатoadренальная система

Для цитирования. Влияние супрессивной терапии левотироксином натрия на состояние сердечно-сосудистой и симпатoadренальной систем / Т. А. Митюкова [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2019. – Т. 63, № 2. – С. 207–215. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-2-207-215>

Tatyana A. Mityukova¹, Tatyana A. Leonova², Svetlana B. Kohan¹, Andrey A. Sivakov³, Olga E. Polulyach¹

¹*Institute of Physiology of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

²*Minsk City Oncological Dispensary, Minsk, Republic of Belarus*

³*Belarusian Medical Academy of Postgraduate Education, Minsk, Republic of Belarus*

**EFFECT SUPPRESIVE THERAPY WITH LEVOTHYROXINE ON THE STATE
OF THE CARDIOVASCULAR AND SYMPATHOADRENAL SYSTEMS**

(Communicated by Corresponding Member Vladimir V. Soltanov)

Abstract. Thyroid hormones can affect the cardiovascular system directly by binding to nuclear thyroid receptors, as well as indirectly by changing the neuro – humoral status of the body as a whole. The aim of the work was to assess the effect of levothyroxine suppressive therapy on the regulation of the heart rate and activity of the sympathoadrenal system, as well as the level of cortisol in the blood of young patients with thyroid cancer. It is shown that the effect of suppressive therapy with levothyroxine on the state of the cardiovascular system is manifested in an increase in the risk of tachycardia and changes in heart rate variability associated with the body mass index. Patients with thyroid cancer had a sharp decrease in normetanephrine (norepinephrine metabolite) in the urine. The levels of metanephrine (metabolite of adrenaline) and dopamine in the urine was dependent on the tonus of the autonomic nervous system and blood pressure. The revealed shifts indicate that against the background of subclinical hyperthyroidism, the mechanisms aimed at stabilizing the heart rate and preventing the effects of hyperstimulation of thyroid and beta-adrenoreceptors of the myocardium are included.

Keywords: suppressive therapy with levothyroxine, cardiovascular system, sympathoadrenal system

For citation: Mityukova T. A., Leonova T. A., Kohan S. B., Sivakov A. A., Polulyach O. E. Effect suppressive therapy with levothyroxine on the state of the cardiovascular and sympathoadrenal systems. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2019, vol. 63, no. 2, pp. 207–215 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-2-207-215>

Введение. Известно, что гормоны щитовидной железы (ЩЖ) реализуют свое действие, главным образом, путем связывания с ядерными тиреоидными рецепторами (ТР). У человека существуют две основные изоформы ядерных тиреоидных рецепторов – ТР-альфа и ТР-бета, а также их разновидности [1–4]. Экспрессия ТР-альфа-1 мРНК выражена во всех тканях, но особенно в почках, печени, головном мозге и миокарде [4]. У гипертиреоидных пациентов наблюдаются повышенные хронотропный и инотропный эффекты, а также увеличение сердечного выброса. Тиреоидные гормоны стимулируют синтез всех белков в миокарде, включая транскрипцию ряда специфических белков, таких как тяжелые цепи миозина и др. [1–4]. Рецепторы тиреоидных гормонов сопряжены также с активацией синтеза Са-АТФ-азы и Na-K-АТФ-азы, которые являются важными регуляторами работы сердца [4].

Сердечно-сосудистая система является крайне чувствительной к действию даже незначительного избытка тиреоидных гормонов [1; 2]. Наибольшей биологической активностью среди тиреоидных гормонов обладает трийодтиронин (Т3), так как он связывается с рецепторами со значительно большей аффинностью, чем тироксин (Т4). Прямое действие Т3 на кардиомиоциты может осуществляться также и с помощью внеядерных механизмов. Мембранное взаимодействие приводит к активации транспорта аминокислот, глюкозы, кальция и других ионов через плазматическую мембрану клетки. Т3 повышает потребление кислорода клетками и проницаемость клеточной мембраны, что способствует усилению сократимости миофибрилл [1–4].

Наряду с прямым действием на ядерные рецепторы и мембраны клеток ткани миокарда, существуют также опосредованные эффекты гормонов ЩЖ на состояние сердечно-сосудистой системы (ССС), обусловленные влиянием тиреоидных гормонов на нейро-гуморальный статус организма в целом. Эти влияния труднее всего поддаются изучению в связи с большим количеством циркулирующих в крови агентов, воздействующих на ССС, а также с вариациями тонуса вегетативной нервной системы (ВНС), обеспечивающей регуляцию сердечного ритма на фоне измененного гормонального статуса. Изучение нейро-гуморальных опосредованных эффектов тиреоидных гормонов актуально с точки зрения выяснения патогенетических и адаптационных механизмов, развивающихся на фоне супрессивной терапии левотироксином у пациентов с карциномой ЩЖ, которые получают лечение по жизненным показаниям в течение продолжительного периода времени, практически до достижения полной ремиссии основного заболевания [5; 6]. В литературе имеются сведения о воздействии субклинического гипертиреоза на состояние вегетативной нервной системы и уровень катехоламинов в крови и моче пациентов, однако эти данные являются противоречивыми и неоднозначными [7–11], что требует дополнительных исследований. В целом, состояние гипертиреоза характеризуется повышением чувствительности органов и тканей к стимуляции адренэргических нервных волокон и к действию катехоламинов (КА), циркулирующих в крови, что связано с повышением количества и аффинности бета-адренорецепторов [1–3; 12; 13]. Установлено, что гормоны коркового слоя надпочечников (кортизол и др.) препятствуют десинсетизации, которая может развиваться при интенсивной и длительной адренэргической стимуляции. Таким образом, глюкокортикоиды поддерживают высокий уровень активации адренэргических процессов [1; 12; 13]. Известно также, что при гипертиреозе нарастает влияние тиреоидных гормонов на деструкцию кортизола в печени, что может привести к кортикостероидной недостаточности.

Основным гормоном мозгового вещества надпочечников является адреналин, тогда как норадреналин преимущественно служит нейромедиатором и образуется в симпатических нервных окончаниях как в ЦНС, так и на периферии; дофамин также является медиатором ЦНС, и, наряду с этим – предшественником для синтеза норадреналина и адреналина, а также медиатором паракринной регуляции в ряде периферических органов и тканей. Синтез КА в надпочечниках состоит из нескольких стадий, включающих следующие превращения: тирозин–дезоксифенила-

ланин–дофамин–норадреналин–адреналин. Инактивация КА в синапсах происходит преимущественно за счет обратного захвата, а в периферической крови – при участии двух ферментов: катехол-О-метилтрансферазы (превращение норадреналина в норметанефрин и адреналина в метанефрин), а также моноаминоксидазы с образованием в конечном итоге ванилилминдальной кислоты (ВМК) [1–3]. Определение метаболитов, также как и самих КА в моче наиболее информативно, так как отражает продукцию КА и поэтому используется в лабораторной диагностике.

Цель работы – оценить влияние супрессивной терапии левотироксином натрия на регуляцию сердечного ритма, активность симпатoadренальной системы (САС) и уровень кортизола в крови у молодых пациентов с тиреоидным раком.

Материалы и методы исследования. Методом рандомизации в основную группу были отобраны 93 человека (73 женщины, 20 мужчин) из общего количества обследованных пациентов с высокодифференцированным раком щитовидной железы (ВДРЩЖ) с целевым уровнем супрессии тиреотропного гормона (ТТГ < 0,5 мЕ/л). Все пациенты подвергались тотальной тиреоидэктомии по поводу ВДРЩЖ и получали супрессивную терапию левотироксином не менее 10 лет. Средняя доза препарата (медиана и процентиля) составляла 2,4 [2,0–2,8] мкг/кг массы тела, возраст пациентов – в среднем 30,5 лет (интервал: 20–45 лет), продолжительность лечения – в среднем 15 лет. Все пациенты проходили радиоiodтерапию (РИТ): 72 чел. – 1–2 курса и 21 чел. – 3 и более курсов. Лица с индексом массы тела (ИМТ) в пределах нормы (18–25 кг/м²) составляли 71 %, с избыточной массой тела (25–30 кг/м²) – 20 %, с ожирением I степени (30–35 кг/м²) – 9 %. Среди обследованных пациентов 23 % составляли лица с некомпенсированным послеоперационным гипопаратиреозом (уровень общего кальция в крови < 2,0 ммоль/л).

В контрольную группу (50 чел.) вошли практически здоровые лица без отклонений в тиреоидном и биохимическом статусе: 36 женщин и 14 мужчин. Возрастной интервал – 20–45 лет, средний возраст – 31,08 ± 0,95 года. Лица с ИМТ в пределах нормы составили 68 %, с избыточной массой тела – 20 %, с ожирением I степени – 12 %. Интервалы нормы для молодых взрослых: частота сердечных сокращений (ЧСС) – 60–80 уд/мин, артериальное давление (АД) – от 100/60 до 130/85 мм рт. ст. Лица с ранее диагностированными болезнями системы кровообращения и другими сопутствующими заболеваниями были исключены из целевой группы пациентов и из группы контроля.

Дизайн исследования предусматривал сравнение двух основных групп (целевая группа пациентов и группа контроля) по ниже перечисленным показателям. Влияние супрессивной терапии левотироксином оценивалось в зависимости от уровня ТТГ, т. е. в двух подгруппах пациентов (ТТГ < 0,1 и ТТГ = 0,1–0,5 мЕ/л). Проводилось сравнение между этими группами и с контролем. Поскольку среди пациентов были лица с повышенным АД и повышенной ЧСС, то эти подгруппы также были выделены и сравнивались с контролем. Влияние избыточной массы тела оценивалось путем подразделения группы контроля и группы пациентов на подгруппы в зависимости от ИМТ. Содержание катехоламинов в моче рассматривалось в зависимости от тонуса вегетативной нервной системы в группе контроля и в группе пациентов.

У всех обследованных оценивали ЧСС и АД с использованием прибора Microlife (Швейцария). С помощью программно-приборного обеспечения «Варикард» (ООО «Медицинские Компьютерные системы», Россия) была проведена оценка вариабельности сердечного ритма (ВСР), основанная на анализе нормальных R–R-интервалов, измеряемых по ЭКГ за 5-минутный интервал времени с оценкой временных и спектральных показателей. Основными показателями ВСР служили: SDNN, мс – стандартное отклонение полного массива кардиоинтервалов R–R, показатель суммарной мощности вегетативной регуляции; CV – коэффициент вариации полного массива кардиоинтервалов; RMSSD, мс – квадратный корень из суммы разностей последовательного ряда кардиоинтервалов, показатель активности парасимпатического отдела регуляции; SI – стресс-индекс, показатель преобладания центральных механизмов регуляции над автономными; HF, % – мощность высокочастотной составляющей спектра, показатель парасимпатической активности; LF, % – мощность низкочастотной составляющей спектра, показатель симпатической активности; LF/HF – показатель симпато-вагусного баланса; IC – индекс централизации (IC = (LF + VLF) / HF), преобладание центрального контура регуляции над автономным.

Для определения катехоламинов использовали разовую утреннюю порцию мочи. Забор крови из локтевой вены осуществляли в утреннее время натощак (8.00–10.00) до приема левотироксина. В момент забора крови пациенты находились в сидячем положении.

Определение большинства КА и их метаболитов в моче проводили с использованием высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ-МС/МС) как описано в [14]. Определение ВМК в моче проводили ИФА-методом на наборах фирмы DRG (США). В пробах мочи определяли содержание креатинина на наборах Диассенс (Беларусь). Концентрацию КА и их метаболитов в моче рассчитывали на 1 мг креатинина, что нивелирует колебания, связанные с разбавлением мочи при различных питьевых режимах. Уровень кортизола в сыворотке крови оценивали ИФА-наборами (Хемма, Россия), тиреотропного гормона и свободного тироксина (св. Т4) – ИФА-наборами фирмы DRG (США).

Численность обследованных групп по каждому из показателей отражена в таблицах. Статистическую обработку результатов проводили с помощью пакета SPSS (версия 12.0). В работе использовали преимущественно непараметрические методы статистики, поскольку распределение изучаемых показателей было отлично от нормального. Достоверность отличий между группами по медианам и процентилям оценивали с использованием коэффициента Манна–Уитни, а достоверность разницы между долями (процентами) – с использованием хи-квадрата.

Результаты и их обсуждение. Лица с повышенной ЧСС (>80 уд/мин) среди пациентов целевой группы составляли около 31 %, а среди лиц группы контроля – практически отсутствовали. Лица с повышенным уровнем АД (>130/85 мм рт. ст.) в группе пациентов составляли около 15 %, а в группе контроля – менее 2 %.

Обследование пациентов показало, что влияние супрессивной терапии на ССС не дает существенных отличий при разных уровнях ТТГ (<0,1 и 0,1–0,5 мЕ/л), но зависит от ИМТ и проявляется в характерных изменениях ВСР (табл. 1).

Т а б л и ц а 1. Частота (%) сниженных и повышенных показателей ВСР у лиц контрольной группы и у пациентов в зависимости от ИМТ

Table 1. Frequency (%) of decreased and increased indices of the variability and heart rate of the control group patients and the patients depending on the body mass index

Показатель Index	Контроль, ИМТ = 18–25 кг/м ² , n = 34 Control, Body Mass Index = 18–25 kg/m ² , n = 34	Контроль, ИМТ > 25 кг/м ² , n = 16 Control, Body Mass Index > 25 kg/m ² , n = 16	Пациенты, ИМТ = 18–25 кг/м ² , n = 66 Patients, Body Mass Index = 18–25 kg/m ² , n = 66	Пациенты, ИМТ > 25 кг/м ² , n = 27 Patients, Body Mass Index > 25 kg/m ² , n = 27
SDNN < 30 мс	8,8	6,3	3,0	29,6 ^Δ
SDNN > 100 мс	29,4	6,3	42,4	11,1 ^Δ
SDNN > 200 мс	14,7	6,3	33,0*	3,7 ^Δ
RMSSD < 20 мс	8,8	18,8	7,6	37,0 ^Δ
RMSSD > 50 мс	50,0	25,0	57,8	22,2 ^Δ
CV > 12 %	29,4	12,5	39,4	11,1 ^Δ
SI < 50	44,1	12,5 ^Δ	53,0	18,5 ^Δ
SI > 150	20,6	37,5	21,2	44,4 ^Δ
IC < 2	67,6	75,0	77,3	48,1 ^Δ
LF/HF > 1,6	23,5	18,8	21,2	44,4 ^Δ

Пр и м е ч а н и я: * – достоверные отличия от контроля, $p < 0,05$; Δ – достоверные отличия между подгруппами с различными ИМТ, $p < 0,05$.

Notes: * – significant differences from the control group, $p < 0,05$; Δ – significant differences between the subgroups with different ИМТ, $p < 0,05$.

У практически здоровых лиц почти не было отличий по частоте сниженных и повышенных значений показателей ВСР за пределы нормы в зависимости от массы тела, за исключением сниженных значений показателя SI (табл. 1). У пациентов с ВДРЦЖ такие отличия регистрировались по целому ряду параметров ВСР (табл. 1). У пациентов с нормальным ИМТ отмечалось повышение SDNN > 100 мс в 42,4 %, CV > 12 в 39,4 %, что было достоверно чаще, чем у таковых с избыточной массой тела. При нормальном ИМТ достоверно чаще встречались показатели сни-

жения активности центрального контура регуляции ($SI < 50$ в 53,0 % и $IC < 2$ в 77,3 %) и нарастания активности парасимпатического отдела регуляции ($RMSSD > 50$ мс в 57,8 %), чем при избыточной массе тела (табл. 1). У большинства лиц с повышенной ВСП отмечалась ЧСС > 80 уд/мин.

У пациентов с избыточной массой тела чаще регистрировалось снижение ВСП ($SDNN < 30$ мс в 29,6 % случаев), снижение активности парасимпатического отдела регуляции ($RMSSD < 20$ мс в 37,0 %), нарастание вклада центрального контура регуляции ($SI > 150$ в 44,4 %) и преобладание симпатикотонии ($LF/HF > 1,6$) у 44,4 % лиц. Все эти признаки были характерны для пациентов с повышенным АД ($>130/80$ мм рт. ст.).

Определение КА и их метаболитов в моче показало, что средние уровни адреналина, метанефрина, дофамина и ВМК у пациентов с ВДРЩЖ не дают достоверных отличий от таковых в группе контроля (табл. 2). Было выявлено только резкое снижение содержания норметанефрина в моче у пациентов целевой группы (2,0 [0,0–5,4] по сравнению с 12,8 [0,0–45,1] нг/мг креатинина в моче в контроле, $p < 0,05$).

Т а б л и ц а 2. Уровни катехоламинов и их метаболитов у лиц группы контроля и пациентов целевой группы
T a b l e 2. Levels of catecholamines and their metabolites of the control group patients and the target group patients

Показатель Index	Контроль, $n = 32$ Control, $n = 32$	Пациенты, $n = 88$ Patients, $n = 88$
Адреналин, нг/мг креатинина в моче	2,3 [0,9–3,8]	2,0 [1,2–3,5]
Метанефрин, нг/мг креатинина в моче	5,7 [4,1–9,1]	4,3 [3,4–6,8]
Норметанефрин, нг/мг креатинина в моче	12,8 [0–45,1]	2,0 [0,0–5,4]*
ВМК, мкг/мг креатинина в моче	7,3 [6,6–8,5]	6,6 [5,7–8,5]
Дофамин, нг/мг креатинина в моче	102,7 [85–123]	90,5 [67–130]

П р и м е ч а н и е: * – достоверные отличия от группы контроля, $p < 0,05$.

N o t e: * – significant differences from the control group, $p < 0.05$.

Данный факт воспроизводился также у пациентов с различным уровнем супрессии ТТГ, включая суперсупрессию ($ТТГ < 0,1$ мЕ/л), и у лиц с повышенными значениями ЧСС и АД, что, по-видимому, свидетельствует о тотальном снижении активности норадренэргической стимуляции на фоне действия супрессивных доз левотироксина. Эти данные соответствуют классическим представлениям о взаимодействии тиреоидной и симпатoadреналовой систем. Известно, что состояние гипертиреоза сопровождается повышением количества и чувствительности бета-адренорецепторов к своим агонистам, что может вызывать адаптивную реакцию – снижение активности норадренэргических медиаторных процессов на синаптическом уровне [1].

Далее был проведен анализ уровней КА и их метаболитов в зависимости от тонуса ВНС (по данным ВСП) у пациентов целевой группы и у лиц группы контроля (табл. 3). Тонус ВНС оценивали исходя из значений показателя симпато-вагусного баланса LF/HF , который в норме приближается к 1,0 [15]. Обследуемые были разделены на подгруппы в зависимости от индивидуальных соотношений LF/HF . При значениях $LF/HF > 1,2$ отмечали преобладание симпатического тонуса ВНС, а при значениях $LF/HF < 0,8$ – преобладание парасимпатического тонуса ВНС [15]. В группе контроля лица с преобладанием симпатического тонуса ВНС составляли 28 %, а с преобладанием парасимпатического – 34 %, остальные 38 % имели значение LF/HF в пределах 0,8–1,2. В группе пациентов лица с преобладанием симпатического тонуса составляли 34 %, а с преобладанием парасимпатического – 57 %. Повышение доли лиц с парасимпатическим тонусом ВНС в группе пациентов по сравнению с контролем было статистически достоверным ($p < 0,05$).

Показано, что у пациентов с преобладанием симпатического тонуса ВНС отмечались достоверно более низкие значения метанефрина в моче (3,5 [2,7–4,1] нг/мг креатинина по сравнению с содержанием аналита у лиц контрольной группы 4,9 [4,1–6,2] при аналогичном тонусе ВНС, $p < 0,05$), а также достоверно более низкие значения дофамина (85,9 [60–107] по сравнению с 115,6 [101–126] в контроле). Следует отметить, что преобладание симпатического тонуса ВНС было наиболее выраженным у пациентов с повышенным АД, когда значения LF/HF составляли в среднем 1,6 [1,2–1,8]. Снижение продукции дофамина и метанефрина, по-видимому, отражает компенсаторный механизм подавления функциональной активности мозгового слоя надпочечников

Т а б л и ц а 3. Содержание катехоламинов и их метаболитов в моче у лиц группы контроля и у пациентов с ВДРЦЖ в зависимости от тонуса ВНС

Table 3. Content of catecholamines and their metabolites in the urine of the control group patients and of the highly differentiated thyroid cancer patients depending on the tonus of the autonomic nervous system

Показатель Index	Преобладание симпатического тонуса ВНС, LF/HF > 1,2 Prevalence of the sympathetic tonus of the autonomic nervous system, LF/HF > 1.2	Преобладание парасимпатического тонуса ВНС, LF/HF < 0,8 Prevalence of the parasympathetic tonus of the autonomic nervous system, LF/HF < 0.8
<i>Группа контроля</i>		
	<i>n = 9</i>	<i>n = 11</i>
Адреналин, нг/мг креатинина в моче	1,1 [0,5–4,2]	3,1 [1,2–3,8]
Метанефрин, нг/мг креатинина в моче	4,9 [4,1–6,2]	7,1 [3,8–10,0]
Норметанефрин, нг/мг креатинина в моче	14,2 [0–45,2]	11,8 [0–43,9]
Дофамин, нг/мг креатинина в моче	115,6 [101,1–125,6]	94,7 [56,3–102,7]
ВМК, мкг/мг креатинина в моче	7,27 [6,1–7,9]	7,5 [6,6–8,5]
<i>Пациенты</i>		
	<i>n = 30</i>	<i>n = 50</i>
Адреналин, нг/мг креатинина в моче	1,7 [1,0–2,2]	1,9 [1,5–3,5]
Метанефрин, нг/мг креатинина в моче	3,5 [2,7–4,1]*	4,7 [3,4–6,8]
Норметанефрин, нг/мг креатинина в моче	2,6 [0,0–5,9]*	1,7 [0,0–5,0]*
Дофамин, нг/мг креатинина в моче	85,9 [60,0–106,9]*	89,3 [79,2–132,4]
ВМК, мкг/мг креатинина в моче	6,4 [5,4–6,6]	7,1 [6,4–8,5]

Примечание. * – достоверные различия между группами контроля и пациентов с одинаковым тонусом ВНС, $p < 0,05$.

Note. * – significant differences between the control group patients and the patients with the same tonus of the autonomic nervous system, $p < 0.05$.

на фоне супрессивной терапии у пациентов с преобладанием симпатического тонуса ВНС и его физиологическими последствиями в виде повышенного АД.

Для понимания полученных данных целесообразно обратиться к более ранним работам по обследованию детей с радиоиндуцированным раком ЩЖ, когда они были в возрасте $13,6 \pm 1,5$ года и продолжительность их лечения составляла в среднем около 3,5 лет. В [11] отмечается, что нормальный тип вегетативной реактивности у детей-пациентов встречался значительно реже (36,4 %) ($p < 0,05$), чем у здоровых (59,1 %), преобладающим был асимпатикотонический тип (50,9 %) ($p < 0,05$). У большинства детей-пациентов (63,6 %) было выявлено недостаточное обеспечение ортостаза. Автор выдвигает предположение о том, что низкий уровень функционирования симпатической нервной системы у детей, прооперированных по поводу рака ЩЖ, связан с приемом повышенных доз тиреоидных гормонов, эффекты которых сходны с эффектами симпатoadrenalовой системы. В условиях даже незначительного избытка тиреоидных гормонов уменьшается потребность организма в эффектах симпатической нервной системы, снижается тонус центров симпатической нервной системы и влияние центрального контура регуляции на сердечный ритм [11]. Очевидно, низкий уровень функционирования симпатической нервной системы, сформированный еще на ранних сроках лечения, в дальнейшем сохранился и у взрослых пациентов, получающих супрессивную терапию левотироксином более 10 лет. Аналогичные сдвиги по снижению активности симпатической нервной системы при гипертиреозе были зарегистрированы Н. Kitamura и соавт. [7].

Далее было проведено определение уровня кортизола в сыворотке крови пациентов и лиц целевой группы. Как видно из данных табл. 4, у пациентов целевой группы отмечался достоверно более низкий уровень кортизола, чем в группе контроля (медиана 292,7 по сравнению с 409,9 нмоль/л, $p < 0,05$).

Сравнение двух подгрупп пациентов с различными уровнями супрессии ТТГ выявило, что снижение содержания кортизола отмечается только в подгруппе суперсупрессии ТТГ ($< 0,1$ мЕ/л), а в подгруппе умеренной супрессии (ТТГ = $0,1–0,5$ мЕ/л) – среднее значение гормона не отличается от контроля. У лиц с суперсупрессией ТТГ были выявлены единичные случаи снижения уровня гормона за пределы референтной границы нормы (< 138 нмоль/л) – 5 человек, что составляет 9,3 %. Интересно, что медианы доз тироксина в этих двух подгруппах не давали достовер-

Т а б л и ц а 4. Уровень кортизола в сыворотке крови и доза левотироксина (L-T4) у пациентов целевой группы в зависимости от степени супрессии ТТГ и отклонений ЧСС и АД от нормы

T a b l e 4. Cortisol level in the blood serum and the levothyroxine (L-T4) dose in the target group patients depending on the suppression degree of thyroid-stimulating hormone and the deviations of the heart rates and the arterial pressure from the norm

Группа Group	Кортизол, нмоль/л Cortisol, nmole/l	Доза L-T4, мкг/кг L-T4 dose, mcg/kg
1. Контроль, $n = 44$	409,9 [292,6–543,2]	
2. Пациенты, целевая группа (ТТГ < 0,5 мЕ/л), $n = 73$	292,7 [215,8–329,1]*	2,4 [2,0–2,8]
3. Пациенты (ТТГ < 0,1 мЕ/л), $n = 54$	262,3 [199,3–306,7]**	2,4 [2,0–2,7]
4. Пациенты (ТТГ = 0,1–0,5 мЕ/л), $n = 19$	487,5 [425,2–629,2]	2,3 [1,9–2,8]
5. Пациенты (ЧСС > 80 уд/мин), $n = 29$	424,4 [355,8–540,8]	2,4 [2,1–2,8]
6. Пациенты (АД > 130/85 мм рт. ст.), $n = 13$	590,0 [515,0–689,2]*	1,9 [1,8–2,3]

П р и м е ч а н и я: * – достоверные отличия от контроля, $p < 0,05$; • – достоверные отличия между группами 3 и 4, $p < 0,05$.

N o t e s: * – significant differences from the control group, $p < 0.05$; • – significant differences between groups 3 and 4, $p < 0.05$.

ных отличий (2,4 и 2,3 мкг/кг), что, по-видимому, указывает на повышенную чувствительность пациентов с суперсупрессией ТТГ к действию стандартных доз тироксина.

Подгруппа пациентов с АД > 130/85 мм рт. ст. характеризовалась достоверным повышением содержания кортизола в крови по сравнению с контролем (табл. 2). У этих пациентов встречались значения кортизола, выходящие за пределы референтной нормы, превышающие 690 нмоль/л – 3 / 13, что составляет 23 %. Медиана дозы левотироксина у этих пациентов имела тенденцию к снижению по сравнению с дозой у пациентов с нормальным давлением (1,9 по сравнению с 2,4 мкг/кг). По-видимому, повышение АД связано не столько с влиянием супрессивной терапии, сколько с индивидуальной предрасположенностью к артериальной гипертензии, что подтверждает и повышенный уровень кортизола.

Таким образом, влияние супрессивной терапии левотироксином на состояние ССС проявлялось, прежде всего, в нарастании риска тахикардии – повышение ЧСС регистрировалось у 31 % лиц при отсутствии в контроле. У лиц с нормальной массой тела супрессивная терапия приводила к повышению variability сердечного ритма. При сочетании повышения variability ВСР со снижением активности центрального контура регуляции, как правило, регистрировалась ЧСС > 80 уд/мин.

Парадоксальным может показаться факт нарастания доли лиц с преобладанием парасимпатического тонуса ВНС (57 % по сравнению с 34 % в контроле, $p < 0,05$) (табл. 3). Как известно из общей физиологии, парасимпатический тонус ВНС ассоциирован с брадикардией [1; 3]. Однако на фоне воздействия высоких доз тироксина и, соответственно, резкой активации хронотропного и инотропного эффектов, понижающая регуляция сердечного ритма, по-видимому, достигается за счет повышения мощности высокочастотной составляющей спектра ВСР (HF) на фоне некоторого снижения мощности низкочастотной составляющей спектра (LF) и, соответственно, снижения соотношения LF/HF < 0,8 в сторону преобладания парасимпатического тонуса ВНС.

У пациентов целевой группы наблюдалось уменьшение в 6 раз концентрации норметанефрина – метаболита норадреналина в моче (табл. 2, 3), что косвенно свидетельствует о снижении активности нейромедиаторного звена САС. Отмечалось также некоторое снижение уровня кортизола в крови при суперсупрессии ТТГ (табл. 4).

В общей группе пациентов присутствовала немногочисленная подгруппа лиц с преобладанием симпатического тонуса ВНС (LF/HF > 1,2 – 34 %; табл. 3), которая отличалась достоверным снижением уровней метанефрина и дофамина в моче. Выделение подгруппы пациентов с повышенным АД продемонстрировало у них наиболее выраженное преобладание симпатического тонуса ВНС (LF/HF = 1,6 [1,2–1,8]) и достоверное снижение уровня метанефрина в моче. Эти факты, по-видимому, свидетельствуют о снижении активности мозгового вещества надпочечников при нарастании симпатического тонуса ВНС и угрозе развития гипертензии.

Литературные данные и полученные результаты [1–3; 6–11] свидетельствуют о том, что при гипертиреозе наблюдается активация хронотропного эффекта. При этом включаются механизмы, направленные на понижающую регуляцию сердечного ритма и предупреждение эффектов

гиперстимуляции тиреоидных рецепторов и бета-адренорецепторов миокарда. Такими механизмами в большинстве случаев являются снижение продукции адренэргического медиатора и преобладание парасимпатического тонуса ВНС.

Однако у ряда пациентов наблюдается преобладание симпатического тонуса ВНС, что, как правило, характеризует лиц с повышенным АД. У этих лиц отмечается некоторое повышение уровня кортизола в крови, а также подавление активности мозгового вещества надпочечников, продуцирующего адреналин.

Таким образом, проведенные исследования выявили ряд компенсаторных нейро-физиологических механизмов, направленных на регуляцию сердечного ритма и состояния ССС в целом, которые проявлялись в различной степени в силу индивидуальных особенностей организма пациентов, получающих супрессивную терапию левотироксином.

Выводы.

1. Влияние супрессивной терапии левотироксином натрия на ССС проявлялось в повышении риска тахикардии и нарастании вариабельности сердечного ритма у молодых пациентов с нормальной массой тела.

2. У пациентов с избыточной массой тела отмечались признаки снижения вариабельности сердечного ритма в сочетании с повышением артериального давления.

3. Изучение экскреции катехоламинов и их метаболитов с мочой выявило достоверное снижение уровня норметанефрина (метаболита норадреналина) в общей группе пациентов с тиреоидным раком, а также снижение уровней метанефрина и дофамина у пациентов с преобладанием симпатического тонуса ВНС и повышенным АД по сравнению с группой контроля.

4. Пациенты с суперсупрессией ТТГ ($<0,1$ мЕ/л) отличались достоверным снижением содержания кортизола в крови по сравнению со здоровыми лицами. Повышенный уровень кортизола был отмечен только у пациентов с АД $> 130/85$ мм рт. ст.

5. Показано, что среди пациентов с ВДРЦЖ достоверно чаще отмечалось преобладание парасимпатического тонуса ВНС, чем у лиц контрольной группы (57 % по сравнению с 34 % в контроле).

6. Выявленные сдвиги со стороны симпатoadреналовой системы, по-видимому, носят компенсаторный характер и направлены на адаптацию сердечно-сосудистой системы к воздействию супрафизиологических доз левотироксина.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект М16-062).

Acknowledgements. The work was supported of the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (project no. M16-062).

Список использованных источников

1. Кэттайл, В. М. Патофизиология эндокринной системы / В. М. Кэттайл, Р. А. Арки; пер. с англ. – Москва, 2016. – 336 с.
2. Эндокринология / под ред. С. И. Рябовой. – СПб., 2011. – Т. 1. – 400 с.
3. Физиология эндокринной системы / под ред. Дж. Гриффина и С. Охеды; пер. с англ. – М., 2008. – 496 с.
4. Yen, P. M. Physiological and molecular basis of thyroid hormone action / P. M. Yen // *Physiol. Rev.* – 2001. – Vol. 81, N 3. – P. 1097–1142. <https://doi.org/10.1152/physrev.2001.81.3.1097>
5. Алгоритмы диагностики и лечения злокачественных новообразований / под ред. О. Г. Суконко, С. А. Красного. – Минск, 2012. – С. 440–451.
6. Сердечный ритм у пациентов при лечении супрессивными дозами левотироксина / Т. А. Леонова [и др.] // *Весті НАН Беларусі. Сер. мед. навук.* – 2016. – № 3. – С. 65–73.
7. Cardiac and plasma catecholamine response to dynamic exercise in hyperthyroidism / H. Kitamura [et al.] // *J. Cardiol.* – 1992. – Vol. 22. – P. 219–225.
8. Sympathovagal response to orthostatism in overt and subclinical hyperthyroidism / B. Goichot [et al.] // *J. Endocrinol. Invest.* – 2004. – Vol. 27, N 4. – P. 348–352. <https://doi.org/10.1007/bf03351060>
9. Hyperthyroidism is characterized by both increased sympathetic and decreased vagal modulation of heart rate: evidence from spectral analysis of heart rate variability / J. L. Chen [et al.] // *Clin. Endocrinol.* – 2006. – Vol. 64, N 6. – P. 611–616. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2265.2006.02514.x>
10. Changes in autonomic regulation and ventricular repolarization induced by subclinical hyperthyroidism / F. Galetta [et al.] // *Biomed. Pharmacother.* – 2010. – Vol. 64, N 8. – P. 546–549. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2009.10.001>
11. Безлер, Ж. А. Функциональное состояние сердечно-сосудистой и дыхательной систем у детей, оперированных по поводу рака щитовидной железы: автореф. дис. ... канд. мед. наук / Ж. А. Безлер. – Минск, 2000. – 23 с.

12. Гайтон, А. К. Медицинская физиология / А. К. Гайтон, Дж. Э. Холл; пер. с англ. – М., 2004. – 1296 с.
13. Вегетативные расстройства / под ред. А. М. Вейна. – М., 2003. – 752 с.
14. Определение катехоламинов в моче методом ВЭЖХ/МС у пациентов, получающих супрессивную терапию левотироксином / Т. А. Митюкова [и др.] // Актуальные проблемы медицины: сб. науч. ст. Респ. науч.-практ. конф. с междунар. участием, посвящ. 25-летию основания учреждения образования «Гомельский государственный медицинский университет». – Гомель, 2015. – С. 668–671.
15. Оценка результатов кардиоваскулярных тестов по данным variability сердечного ритма / А. В. Фролов [и др.]. – Минск, 2011. – 68 с.

References

1. Kettle W. M., Arky R. A. *Endocrine Pathophysiology*. Philadelphia, Moscow, 2016. 336 p. (in Russian).
2. Ryabova, S. I., ed. *Endocrinology*. Saint Petersburg, 2011, vol. 1. 400 p. (in Russian).
3. Griffin J. E., Ojeda S. R., eds. *Textbook of Endocrine Physiology*. Moscow, 2008. 496 p. (in Russian).
4. Yen P. M. Physiological and molecular basis of thyroid hormone action. *Physiological Reviews*, 2001, vol. 81, no. 3, pp. 1097–1142. <https://doi.org/10.1152/physrev.2001.81.3.1097>
5. Sukonko O. G., Krasny S. A., eds. *Algorithms of diagnosis and treatment of malignant neoplasms*. Minsk, 2012, pp. 440–451 (in Russian).
6. Leonova T. A., Bezler Zh. A., Mityukova T. A., Kohan S. B., Luzina E. B., Pisarenko A. M., Kondratovich V. A. Heart rate of patients treated with suppressive levothyroxine doses. *Vesti Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya medytsynskikh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, medical series*, 2016, no. 3, pp. 65–73 (in Russian).
7. Kitamura H., Kinugawa T., Miyakoda H., Ogino K., Tomokuni A., Saito M., Hasegawa J., Kotake H., Mashiba H. Cardiac and plasma catecholamine response to dynamic exercise in hyperthyroidism. *Journal of Cardiology*, 1992, vol. 22, pp. 219–225.
8. Goichot B., Brandenberger G., Vinzio S., Perrin A. E., Geny B., Schlienger J. L., Simon C. Sympathovagal response to orthostatism in overt and subclinical hyperthyroidism. *Journal of Endocrinological Investigation*, 2004, vol. 27, no. 4, pp. 348–352. <https://doi.org/10.1007/bf03351060>
9. Chen J. L., Chiu H. W., Tseng Y. J., Chu W. C. Hyperthyroidism is characterized by both increased sympathetic and decreased vagal modulation of heart rate: evidence from spectral analysis of heart rate variability. *Clinical Endocrinology*, 2006, vol. 64, no. 6, pp. 611–616. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2265.2006.02514.x>
10. Galetta F., Franzoni F., Fallahi P., Tocchini L., Graci F., Gaddeo C., Rossi M., Cini G., Carpi A., Santoro G., Antonelli A. Changes in autonomic regulation and ventricular repolarization induced by subclinical hyperthyroidism. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 2010, vol. 64, no. 8, pp. 546–549. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2009.10.001>
11. Bezler Zh. A. *Functional state of the cardiovascular and respiratory systems of children operated for thyroid cancer*. Minsk, 2000. 23 p. (in Russian).
12. Guyton A. C., Hall J. E. *Textbook of Medical Physiology*. Moscow, 2004. 1296 p. (in Russian).
13. Vein A. M., ed. *Autonomic disorders*. Moscow, 2003. 752 p. (in Russian).
14. Mityukova T. A., Sivakov A. A., Luzina E. B., Bezler Zh. A., Kokhan S. B., Leonova T. A. Determining catecholamines in the urine by the ВЭЖХ/МС method in the patients treated by levothyroxine suppressive therapy. *Aktual'nye problemy meditsiny: sbornik nauchnykh statei Respublikanskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoi 25-letiyu osnovaniya uchrezhdeniya obrazovaniya «Gomel'skii gosudarstvennyi meditsinskii universitet» [Actual problems of medicine: a collection of scientific articles of the Republican scientific and practical conference with international participation dedicated to the 25th anniversary of the founding of the educational institution "Gomel State Medical University"]*. Gomel, 2015, pp. 668–671 (in Russian).
15. Frolov A. V., Mel'nikova O. P., Gul' L. M., Radchuk V. Ya. *Assessing the results of cardiovascular tests based on the heart rate variability data*. Minsk, 2011. 68 p. (in Russian).

Информация об авторах

Митюкова Татьяна Алексеевна – канд. биол. наук, вед. науч. сотрудник. Институт физиологии НАН Беларуси (ул. Академическая, 28, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: mityukovat@gmail.com.

Леонова Татьяна Авирировна – канд. мед. наук, заведующий отделением. Минский городской онкодиспансер (ул. Академическая, 2, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: avinir@mail.ru.

Кохан Светлана Болеславовна – науч. сотрудник. Институт физиологии НАН Беларуси (ул. Академическая, 28, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: Skohan@yandex.ru.

Сиваков Андрей Алексеевич – канд. хим. наук, вед. науч. сотрудник. Белорусская медицинская академия последипломного образования (ул. П. Бровки, 3, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: sivakov.andrej@gmail.com.

Полулях Ольга Евгеньевна – науч. сотрудник. Институт физиологии НАН Беларуси (ул. Академическая, 28, 220072, Минск, Республика Беларусь).

Information about the authors

Mityukova Tatyana Alekseevna – Ph. D. (Biology), Leading researcher. Institute of Physiology of the National Academy of Sciences of Belarus (28, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: mityukovat@gmail.com.

Leonova Tatyana Avinirovna – Ph. D. (Medicine), Head of the Department. Minsk City Oncological Dispensary (2, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: avinir@mail.ru.

Kohan Svetlana Boleslavovna – Researcher. Institute of Physiology of the National Academy of Sciences of Belarus (28, Akademicheskaya Str., 220071, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Skohan@yandex.ru.

Sivakov Andrey Alekseevich – Ph. D. (Chemistry), Leading researcher. Belarusian Medical Academy of Postgraduate Education (3, P. Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sivakov.andrej@gmail.com.

Polulyach Olga Evgenievna – Researcher. Institute of Physiology of the National Academy of Sciences of Belarus (28, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus).

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

НАУКИ О ЗЕМЛЕ
EARTH SCIENCES

УДК 550.348 (470, 477)
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-2-216-222>

Поступило в редакцию 08.01.2019
Received 08.01.2019

Г. А. Аронов

Центр геофизического мониторинга Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

**ОСОБЕННОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ
В СОЛИГОРСКОМ ГОРНОПРОМЫШЛЕННОМ РЕГИОНЕ**

(Представлено членом-корреспондентом Р. Е. Айзбергом)

Аннотация. По установленным данным о сейсмических событиях в Солигорском горнопромышленном регионе за 1983–2017 гг. исследованы особенности их распределения по энергетическим характеристикам, в пространстве и во времени. На основе картографических схем эпицентров и графиков суммированных численных значений землетрясений определены периоды и площади представительной регистрации землетрясений для каждого энергетического класса $K = 5, 6, 7, 8$. Построен нормированный график повторяемости сейсмических событий.

Ключевые слова: месторождение, мониторинг, сейсмическая станция, землетрясение, магнитуда, энергетический класс, эпицентр

Для цитирования. Аронов, Г. А. Особенности пространственно-временной сейсмической активности в Солигорском горнопромышленном регионе / Г. А. Аронов // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2019. – Т. 63, № 2. – С. 216–222. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-2-216-222>

Genady A. Aronov

Centre of Geophysical Monitoring of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

**FEATURES OF THE SPACE-TIME DISTRIBUTION OF THE SEISMIC ACTIVITY
WITHIN THE SOLIGORSK MINING REGION**

(Communicated by Corresponding Member Romma Ye. Aizberg)

Abstract. Data on the earthquakes recorded in the Soligorsk mining area during the years 1983–2017 were used to investigate their distribution features both in the energy, and space-time characteristics. Based on the sketch maps of the epicenters and the graphs of the accumulated numerical values of the earthquakes the periods and areas of the representative earthquakes were determined for each energy class $K = 5, 6, 7, 8$. A normalized graph of the earthquake recurrence was created.

Keywords: deposit, monitoring, seismic station, earthquake, magnitude, energy class, epicenter

For citation: Aronov G. A. Features of the space-time distribution of the seismic activity within the Soligorsk mining region. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2019, vol. 63, no. 2, pp. 216–222 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-2-216-222>

Введение. Солигорский горнопромышленный регион характеризуется аномально высоким уровнем техногенной нагрузки на недра. Здесь расположено уникальное, крупнейшее в Европе, Старобинское месторождение калийных солей, которое было открыто в 1949 г. и разрабатывается с начала 1960-х годов [1; 2].

Объектами исследования являются сейсмические события, происходящие в Солигорском горнопромышленном регионе. В связи с этим организация и качество сейсмических наблюдений должны соответствовать задачам, которые решают службы сейсмологического мониторинга.

К основным опасностям, возникающим при проведении подземных шахтных работ, относится возникновение индуцированной сейсмичности. Как правило, для оценки и прогноза степени сейсмической опасности в районе месторождения организуется регулярный мониторинг сейсмической обстановки. Риск возникновения индуцированной сейсмичности вызывается активизацией разломов в горнопромышленном регионе, где вследствие разработки месторождения осадочных руд происходят изменения тектонических напряжений в подземных горизонтах. Пространственное развитие геодинамического процесса в виде проявления сейсмической активности выходит за пределы шахтных полей, охватывая территории, примыкающие к району непосредственных горных работ. Осредненные характеристики сейсмичности слабо зависят от особенностей технологии проведения выемок пород, и, в первую очередь, определяются геометрией разломов в регионе и характером региональных тектонических напряжений. В связи с этим возникает актуальная задача выявить закономерности взаимосвязи пространственно-временного распределения сейсмической активности с возникающими напряжениями земной коры в районах разработки месторождений полезных ископаемых [3].

Материалы и методы исследования. Основными исходными данными для сейсмологических исследований являются результаты непрерывных круглосуточных наблюдений на сейсмических станциях; эти работы в регионе были начаты в 1983 г. Для определения пространственно-временных и энергетических параметров очагов сейсмических событий в районе месторождения была создана Солигорская локальная сеть сейсмических станций, которая в настоящее время имеет в составе 8 пунктов наблюдений: «Волоты» (код (VOL), «Тесово» (TES), «Устронь» (UST), «Чижевка» (CHJ), «Копачевичи» (КАР), «Новый луг» (NVL), «Махновичи» (МАН), «Листопадковичи» (LST). Локальная сеть представляет собой автоматизированную цифровую систему наблюдений в режиме реального времени, технические средства которой состоят из измерительного оборудования – сейсмометров, фиксирующих движения почвы, возникающие в результате распространения сейсмических волн; регистрирующего оборудования – аппаратуры, обеспечивающей запись сигналов от сейсмометров; средств связи для передачи данных в центр сбора и обработки данных; управляющих микропроцессорных модулей; системы энергообеспечения. Все цифровые станции работают в режиме on-line с непрерывной передачей информации через мобильную сеть в центр сбора информации в Минске. Обработка данных о сейсмических событиях осуществлялась с помощью пакета компьютерных программ «UniViewer», «IdSeism», «IdSeism», «EmulEq», «Hyposat», «Seisan».

На этой основе была проведена идентификация сейсмических событий, в том числе выделение региональных и местных (локальных) землетрясений, промышленных взрывов, источников природных и техногенных шумов. Интерпретация данных о сейсмических событиях позволила определить время развития события в очаге, координаты эпицентра, глубины очага и его энергетический уровень. Таким образом, в итоге многолетних наблюдений и обработки сейсмических данных были получены инструментальные записи местных землетрясений, установлены их кинематические и динамические параметры, составлены соответствующие бюллетени и каталоги. Первичная фактографическая информация и результаты ее обработки (сейсмологические бюллетени и каталоги землетрясений) системно размещены в специально созданных базах данных.

Результаты и их обсуждение. Результаты обработки сейсмических данных о всех зафиксированных землетрясениях рассмотрим посредством анализа разных сечений поля эпицентров – во времени, в пространстве и по энергетическим характеристикам. За период наблюдений с 1983 г. по настоящее время зарегистрировано и обработано более 1500 сейсмических событий в Солигорском горнопромышленном регионе и окружающей его территории. Зафиксировано 5 землетрясений, которые имели ощутимый характер: 1978 г. (д. Кулаки, магнитуда $M = 3,0$, интенсивность $I_0 = 4-5$), 1983 г. (г. п. Повстынь, $M = 2,8$, $I_0 = 4-5$), 1985 г. (г. Глуск, $M = 3,1$, $I_0 = 3-4$), 1998 г. (п. Погост, $M = 1,9$, $I_0 = 4-5$ и $M = 0,8$, $I_0 = 2-3$) [4; 5]. На рис. 1 приведена картографическая схема эпицентров сейсмических событий, размер радиуса отражает относительную величину магнитуды землетрясения. Особенностью пространственного распределения землетрясений в Солигорском горнопромышленном регионе является проявления сейсмичности за пределами зоны подземных промышленных выработок.

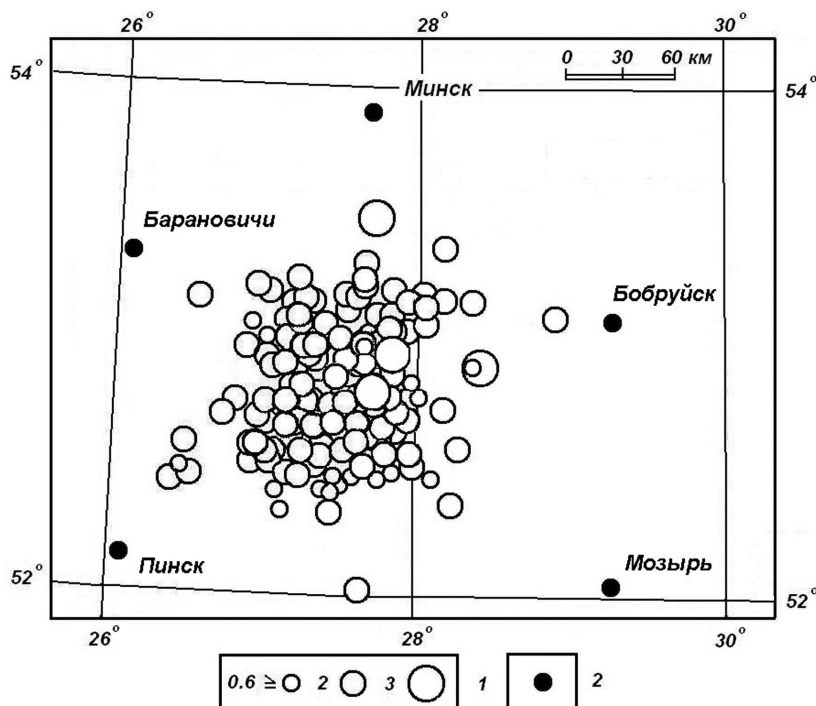


Рис. 1. Картографическая схема эпицентров сейсмических событий в Солигорском горнопромышленном регионе и на сопредельной территории: 1 – магнитуда землетрясений; 2 – город

Fig. 1. Sketch maps of the epicenters of seismic events in the Soligorsk mining area and in the neighboring territory: 1 – magnitudes of earthquakes; 2 – city

Количественное распределение всех $N(K)$ землетрясений разных энергетических классов отражено в табл. 1. Самое сильное землетрясение произошло 17 октября 1985 г. в 01.32 по Гринвичу в 10 км к западу от г. Глуск и в 70–80 км к северо-востоку от г. Солигорск.

Таблица 1. Количественное распределение землетрясений по энергетическим классам K за период 1983–2017 гг.

Table 1. Quantitative distribution of earthquakes in energy classes K during the years 1983–2017

K	4	5	6	7	8	9	N_{Σ}
$N(K)$	5	182	447	516	396	5	1551

Для исследования численных значений представительных периодов наблюдений и оценки представительных энергетических классов землетрясений использованы графики распределения землетрясений разных классов за весь период наблюдений (рис. 2).

Представленные графики позволяют достаточно надежно определить, с какого конкретно года угол наклона стал максимальным, с одной стороны, и стабильным – с другой. Начиная с наиболее сильных событий с $K = 8$ (рис. 2, *d*), угол наклона графика, характеризующий среднюю за год повторяемость возникновения таких сейсмических событий, практически одинаков первые 17 лет наблюдений, с 1983 по 1999 г., со средним значением 18 землетрясений в год. Но начиная с 2000 по 2014 г. повторяемость событий уменьшилась, со средним значением 4 землетрясения в год. Возможно, это связано с естественными процессами высвобождения сейсмической энергии, увеличением числа землетрясений меньшего энергетического класса. Последние три года (2015–2017 гг.) произошло увеличение повторяемости, со средним значением 12 землетрясений в год. Следовательно, время представительной регистрации землетрясений 8 класса составляет $\Delta T = 35$ лет. Для землетрясений 7 класса (рис. 2, *c*) стабильно возрастающий угол наклона графика установился с 1983 г. с повторяемостью 15 землетрясений в год. Но с 2010 по 2012 г. эта повторяемость уменьшилась, со средним значением 5 землетрясений в год. За период с 2013

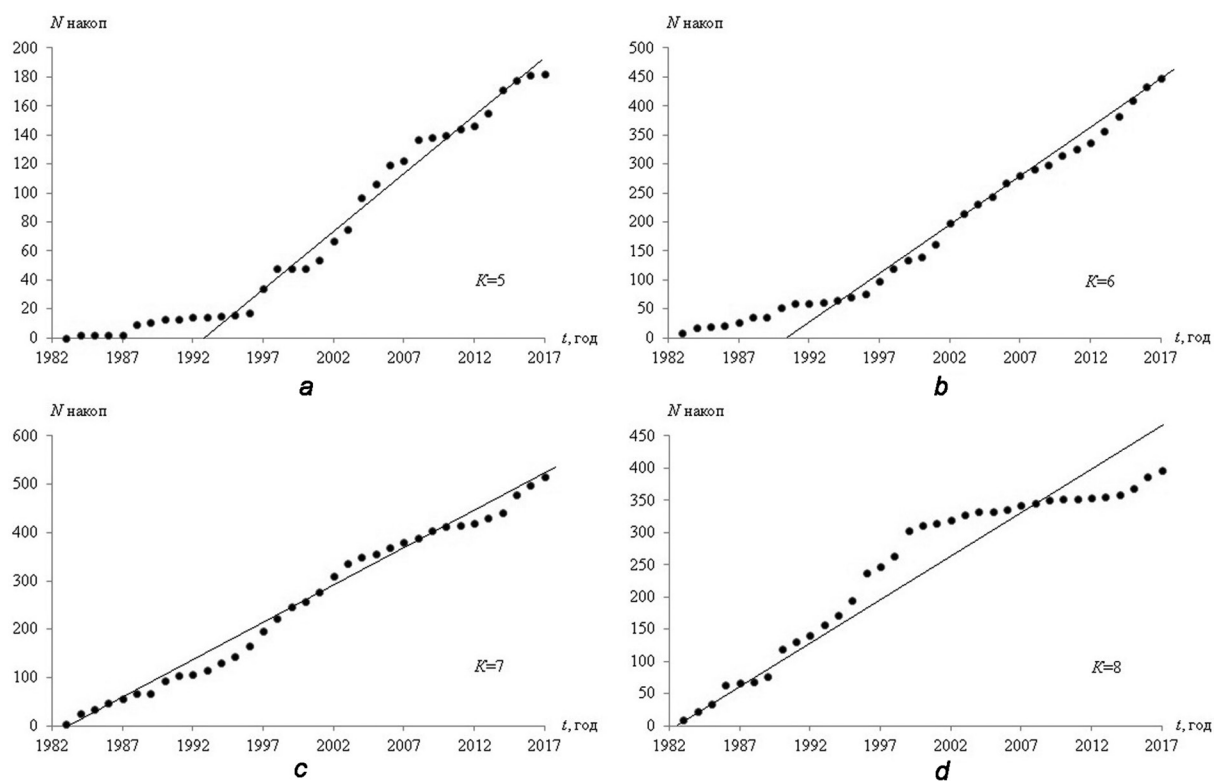


Рис. 2. Графики распределения землетрясений разных энергетических классов $K = 5-8$ за период наблюдений: N – количество накопленных землетрясений, K – класс землетрясения

Fig. 2. Graphs of distribution of earthquakes of different energy class $K = 5-8$ for the observation period: N – number of accumulated earthquakes, K – earthquake class

по 2017 г. произошло увеличение повторяемости, со средним значением 19 землетрясений в год. Интервал представительной регистрации для землетрясений $K = 7$ составляет $\Delta T = 35$ лет. Для землетрясений 6 класса (рис. 2, *b*) наблюдается медленный рост угла наклона графика за период с 1983 по 1996 г. с повторяемостью 5 землетрясений в год. Но начиная с 1997 по 2017 г. эта повторяемость увеличилась, со средним значением 18 землетрясений в год. Интервал представительной регистрации для землетрясений $K = 6$ составляет $\Delta T = 21$ год. Для землетрясений 5 класса (рис. 2, *a*) наблюдается медленный рост угла наклона графика с 1983 по 2000 г. с повторяемостью 3 землетрясения в год. Но начиная с 2001 по 2014 г. эта повторяемость увеличилась, со средним значением 9 землетрясений в год. Последние три года (2015–2017 гг.) произошло снижение повторяемости, со средним значением 4 землетрясения в год. Интервал представительной регистрации для землетрясений $K = 5$ составляет $\Delta T = 17$ лет. Для землетрясений $K = 5-6$ пониженные значения числа событий в период с 1983 по 1996 г. связаны с тем, что регистрация землетрясений проводилась одной сейсмической станцией «Солигорск» с небольшим максимальным увеличением (V_{\max}) на каналах сейсмометров ($Z, N-S, E-W$). Дальнейшее изменение роста числа зарегистрированных слабых землетрясений ($K = 5-6$) напрямую связано с ростом значений максимального увеличения (V_{\max}) и с развитием сети наблюдений (увеличение количества сейсмических станций в районе исследований). Все периоды и длительности уверенной регистрации отражены в табл. 2.

Далее оценим размеры площадей представительной регистрации землетрясений разных энергетических классов с помощью соответствующих покласовых картографических схем расположения эпицентров, изображенных кружками одинакового размера. Затем на этих схемах эпицентров разных энергетических классов были определены контуры предельной и уверенной области регистрации землетрясений. На картографических схемах наблюдается увеличение площади ареала рассеивания эпицентров землетрясений в соответствии с увеличением их энергетического класса $K = 5-8$. Схемы землетрясений $K = 4$ и $K = 9$ содержат максимальное количество

Т а б л и ц а 2. Интервалы и длительности периодов представительных наблюдений за землетрясениями разных энергетических классов

Table 2. Intervals and duration of representative observations of earthquakes of different energy class

К	5	6	7	8
Годы наблюдений	2001–2017	1997–2017	1983–2017	1983–2017
ΔT , лет	17	21	35	35

событий – по пять каждого энергетического класса. Ввиду небольшого числа землетрясений с $K = 4$ (5), этот энергетический класс не является представительным для периода наблюдений 1983–2017 гг. Таким образом, были установлены площади представительной регистрации землетрясений разных классов. Пример реализации этой процедуры приведен для поля эпицентров землетрясений с $K = 8$. Здесь максимальная площадь, включающая все эпицентры, равна $S_{\Sigma} = 14730 \text{ км}^2$, а представительная – $S_{\Sigma} = 6480 \text{ км}^2$. Аналогичная процедура была реализована для землетрясений других классов и все эти данные совмещены на одной плоскости. Построенная картографическая схема K_{\min} ареалов представительной регистрации землетрясений с $K = 5, 6, 7$ и 8 , изображенная на рис. 3, имеет важную особенность – совпадение простираения изолиний разных энергетических классов на юго-восточной периферии региона. Ареал оконтуривания землетрясений с $K = 7$ имеет расширение в северном направлении. Зона оконтуривания землетрясений с $K = 8$ имеет наибольшее расширение в юго-западном и северо-восточном направлениях. Эпицентры землетрясений с $K = 9$ не выходят за пределы выше указанных областей и находятся в выделенных зонах.

В итоге были найдены все исходные данные для построения нормированного графика повторяемости сейсмических событий. Сведения о числе землетрясений (N_{Σ}) разных классов за представительные интервалы наблюдений $\Delta T = f(K)$ и на представительных площадях $\Delta S = f(K)$ отражены в табл. 3. Проведен расчет нормированного числа землетрясений (N^*) и определен его логарифм ($\lg N^*$).

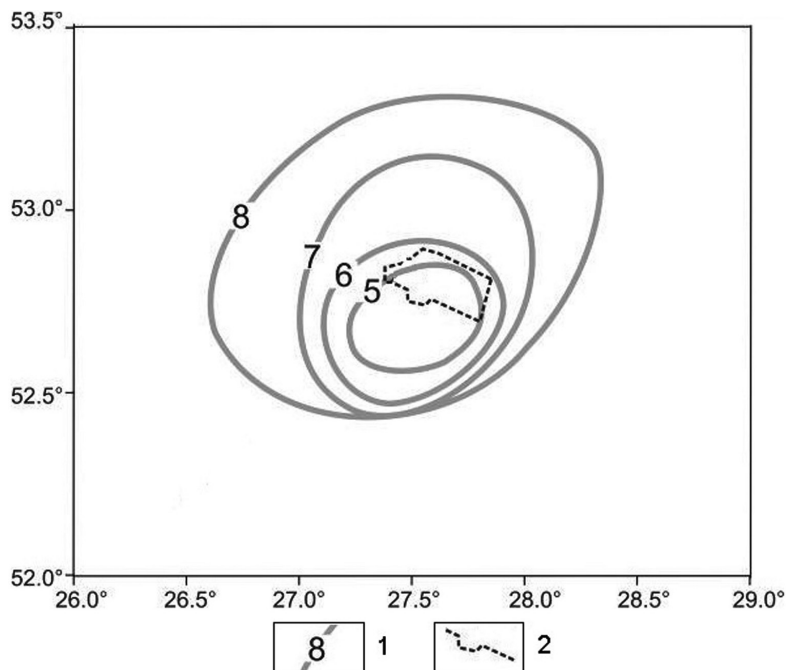


Рис. 3. Картографическая схема K_{\min} ареалов представительной регистрации землетрясений исследуемого региона: 1 – контуры ареалов землетрясений с $K = 5, 6, 7, 8$; 2 – границы шахтных полей

Fig. 3. Sketch map K_{\min} of areals of representative recording of earthquakes of the examined region: 1 – areal contours of earthquakes with $K = 5, 6, 7, 8$; 2 – borders of mine fields

Таблица 3. Исходные данные для построения нормированного графика повторяемости землетрясений на территории Солигорского горнопромышленного региона

Table 3. Initial data for constructing a normalized graph of recurrence of earthquakes in the territory of the Soligorsk mining area

К	Годы наблюдений	ΔT	N_{Σ}	ΔS_{\min} , тыс. км ²	N^*	$\lg N^*$
5	2001–2017	17	134	0,881	8,9471	0,9517
6	1997–2017	21	372	1,603	11,0507	1,0434
7	1983–2017	35	516	4,207	3,5044	0,5446
8	1983–2017	35	396	6,482	1,7455	0,2419

Нормированный график повторяемости землетрясений, построенный по данным табл. 3, изображен на рис. 4.

Параметры графика повторяемости, рассчитанные для диапазона энергетических классов $K = 6–8$, имеют вид

$$\lg N = 3,4151 - 0,4007K.$$

Величина достоверности аппроксимации равна $R^2 = 0,9804$. Угол наклона нормированного графика повторяемости землетрясений составил по модулю $\gamma = |0,40|$, т. е. эта величина является средним долговременным значением для изучаемого региона. На графике наблюдается «левый загиб» для более слабых землетрясений с $K = 5$, который можно объяснить отсутствием достаточной представительности слабых событий. Доминирующим фактором здесь является длительная регистрация землетрясений одной сейсмической станцией (1983–2006 гг.). В регионах с невысоким уровнем сейсмической активности в подобных случаях вопрос о представительности землетрясений с низким энергетическим классом также остается открытым [6; 7]. Изменение угла наклона нормированного графика повторяемости связано с увеличением слабой сейсмичности в области «подготовки» будущего более сильного землетрясения.

Вывод. Изучение энергетических пространственно-временных особенностей сейсмического режима позволяет использовать их при оценке степени сейсмической опасности в исследуемом Солигорском горнопромышленном регионе. Можно констатировать, что оценка периодов и площадей представительной регистрации землетрясений разных энергетических классов позволила построить эмпирическую картографическую схему K_{\min} и график повторяемости с углом наклона $\gamma = |0,40|$. Величина максимального зафиксированного землетрясения для исследуемого региона составила $K_{\max} = 9,5$. На основе изменения угла наклона графика повторяемости можно установить важные данные о процессе «подготовки» более сильного землетрясения.

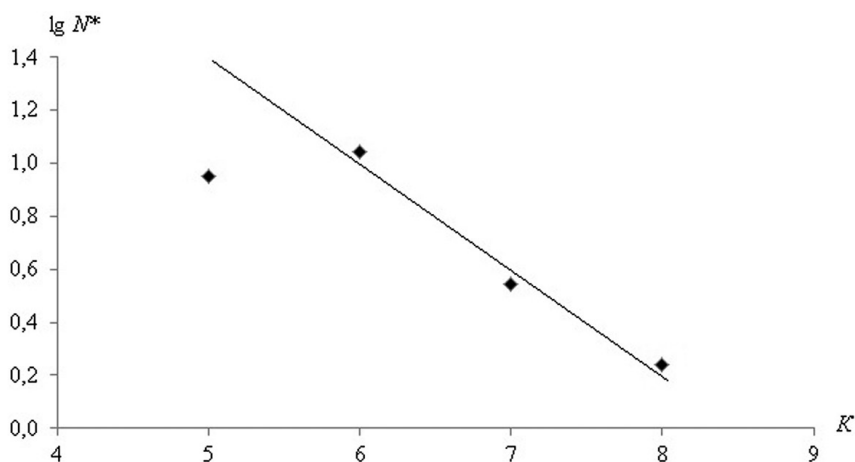


Рис. 4. Нормированный график повторяемости землетрясений Солигорского горнопромышленного региона за 1983–2017 гг.: $\lg N^*$ – логарифм нормированного числа землетрясений, K – энергетический класс сейсмического события

Fig. 4. Normalized graph of recurrence of earthquakes of the Soligorsk mining area for the years 1983–2017: $\lg N^*$ – logarithm of the normalized number of earthquakes, K – energy class of the seismic event

Проявление сейсмических событий за пределами зоны промышленных выработок служит признаком того, что с определенного времени сейсмический процесс, первоначально инициированный подземными горнопромышленными работами, связан с особенностями региональных геодинамических факторов и характеризуется расширением ареала сейсмичности. Произошедшие землетрясения послужили мощным толчком для развития целенаправленных исследований и работ в Солигорском горнопромышленном регионе по совершенствованию системы геодинамической безопасности.

Список использованных источников

1. Геология Беларуси / А. С. Махнач [и др.]. – Минск, 2001. – 815 с.
2. Месторождения калийных солей Беларуси: геология и рациональное недропользование / Э. А. Высоцкий [и др.]. – Минск, 2003. – 264 с.
3. Аронов, Г. А. Динамика миграции зон группирования эпицентров землетрясений в северо-западной части Припятского прогиба / Г. А. Аронов // Анализ, прогноз и управление природными рисками с учетом глобального изменения климата – ГЕОРИСК-2018: материалы X Междунар. науч.-практ. конф.: в 2 т. – Москва, 2018. – Т. 1. – С. 262–267.
4. Aronov, A. G. Seismicity of Belarus / A. G. Aronov, R. R. Seroglazov, T. I. Aronova // *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica*. – 2010. – Vol. 45, N 3. – P. 324–339. <https://doi.org/10.1556/ageod.45.2010.3.7>
5. Aronov, A. G. Stress state of the earth's crust and seismicity in a potassium salt mining region in Belarus / A. G. Aronov, Sh. A. Mukhamediev, T. I. Aronova // *Acta Geodaetica et Geophysica*. – 2014. – Vol. 49, N 2. – P. 125–134. <https://doi.org/10.1007/s40328-014-0042-z>
6. Ризниченко, Ю. В. Проблемы сейсмологии: избр. тр. / Ю. В. Ризниченко. – М., 1985. – С. 34–40.
7. Рейснер, Г. И. Сейсмотектонические методы решения проблем общего сейсмического районирования / Г. И. Рейснер // Изв. АН СССР, Физика Земли. – 1984. – № 4. – С. 3–16.

References

1. Makhnach A. S., Garetsky R. G., Matveyev A. V. [et al.]. *Geology of Belarus*. Minsk, 2001. 815 p. (in Russian).
2. Vysotsky E. A., Gubin V. N., Smychnik A. D., Shemet S. F., Yashin I. A. *Potassium salt deposits of Belarus: geology and efficient management of mineral resources*. Minsk, 2003. 264 p. (in Russian).
3. Aronov G. A. Dynamics of migration of the earthquake epicenter grouping zones in the northwestern part of the Pripyat Trough. *Analiz, prognoz i upravlenie prirodnyimi riskami s uchetom global'nogo izmeneniya klimata – GEORISK-2018: materialy X Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii: v 2 t.* [Analysis, forecast and management of natural risks taking into account global climate change – GEORISK-2018: materials of the X International Scientific and Practical Conference: in 2 vol.]. Moscow, 2018, vol. 1, pp. 262–267 (in Russian).
4. Aronov A. G., Seroglazov R. R., Aronova T. I. Seismicity of Belarus. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica*, 2010, vol. 45, no. 3, pp. 324–339. <https://doi.org/10.1556/ageod.45.2010.3.7>
5. Aronov A. G., Mukhamediev Sh. A., Aronova T. I. Stress state of the earth's crust and seismicity in a potassium salt mining region in Belarus. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica*, 2014, vol. 49, no. 2, pp. 125–134. <https://doi.org/10.1007/s40328-014-0042-z>
6. Riznichenko Yu. V. *Seismology problems: Selected Works*. Moscow, 1985, pp. 34–40 (in Russian).
7. Reisner G. I. Seismotectonic methods for solving problems of general seismic zoning. *Izvestiya AN SSSR, Fizika Zemli = Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 1984, no. 4, pp. 3–16 (in Russian).

Информация об авторе

Аронов Геннадий Аркадьевич – директор. Центр геофизического мониторинга Национальной академии наук Беларуси (ул. Купревича, 1/3, 220141, Минск, Беларусь). E-mail: aronovg@tut.by.

Information about the author

Aronov Genady Arkadievich – Director. Centre of Geophysical Monitoring of the National Academy of Sciences of Belarus (1/3, Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: aronovg@tut.by.

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

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ
TECHNICAL SCIENCES

УДК 536.21
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-2-223-234>

Поступило в редакцию 17.09.2018
Received 17.09.2018

**Член-корреспондент П. С. Гринчук¹, Х. Абухимд², А. В. Акулич¹, М. В. Кияшко¹,
Д. В. Соловей¹, М. О. Степкин¹, В. В. Торопов¹, М. Д. Шашков¹, А. А. Хорт¹, М. Ю. Лях¹**

¹*Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь*

²*Национальный нанотехнологический исследовательский центр, Эр-Рияд, Саудовская Аравия*

**ВЫСОКОТЕПЛОПРОВОДНАЯ КАРБИДОКРЕМНИЕВАЯ КЕРАМИКА
ДЛЯ КРУПНОГАБАРИТНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ОПТИКИ**

Аннотация. Описаны важные аспекты разработанной технологии изготовления карбидокремниевых подложек для оптических зеркал, предназначенных для перспективного использования в космических приложениях. Показано, что получен материал с лучшим сочетанием теплофизических и механических свойств (критерий Максудова) среди известных аналогов, применяемых при создании астрономических зеркал. Описаны характеристики изготовленной из него облегченной подложки зеркала диаметром 205 мм, проведено сравнение с параметрами большинства известных зеркал, изготовленных из карбида кремния для различных космических миссий и в качестве опытных образцов. Показано, что изготовленная подложка характеризуется низкой удельной массой – 16,5 кг/м², что сопоставимо с показателями лучших мировых аналогов.

Ключевые слова: карбид кремния, оптическое зеркало, коэффициент теплопроводности, критерий Максудова

Для цитирования. Высокопроводная карбидокремниевая керамика для крупногабаритной космической оптики / П. С. Гринчук [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2019. – Т. 63, № 2. – С. 223–234. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-2-223-234>

**Corresponding Member Pavel S. Grinchuk¹, Hatem Abuhimad², Andrei V. Akulich¹, Mikhail V. Kiyashko¹,
Dmitry V. Solovoi¹, Mikhail O. Stepkin¹, Victor V. Toropov¹, Mikhail D. Shashkov¹, Aleksandr A. Khort¹, Maria Yu. Liakh¹**

¹*A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Republic of Belarus*

²*National Nanotechnology Research Center King Abdulaziz City for Science and Technology, Riyadh, Saudi Arabia*

HIGH THERMAL CONDUCTIVITY SILICON-CARBIDE CERAMICS FOR LARGE-SIZE SPACE OPTICS

Abstract. The paper describes the important aspects of the developed technology for manufacturing silicon-carbide substrates for optical mirrors intended for future use in space applications. It is shown that the material with the best combination of thermophysical and mechanical properties (Maksutov's criterion) among the known analogs used for making astronomical mirrors is obtained. The characteristics of a mirror made of a lightweight mirror substrate with a diameter of 205 mm are described, compared with the parameters of most known mirrors made of silicon carbide for various space missions and as prototypes. It is shown that the produced substrate is characterized by a rather low specific gravity – 16.5 kg/m², which is comparable with the indicators of the best world analogues.

Keywords: silicon carbide, optical mirror, thermal conductivity coefficient, Maksutov's criterion

For citation: Grinchuk P. S., Abuhimad H., Akulich A. V., Kiyashko M. V., Solovoi D. V., Stepkin M. O., Toropov V. V., Shashkov M. D., Khort A. A., Liakh M. Yu. High thermal conductivity silicon-carbide ceramics for large-size space optics. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2019, vol. 63, no. 2, pp. 223–234 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-2-223-234>

Оптические телескопы с большой апертурой зеркал были и остаются ключевыми инструментами для изучения дальнего и ближнего космоса. Создание таких инструментов связано с потребностью подтверждения космологических теорий возникновения и эволюции Вселенной,

с прогрессом в понимании ее устройства. Характерным примером может служить недавнее обнаружение около трети недостающей барионной массы Вселенной в межгалактических облаках в форме газообразного кислорода при температуре около 1 млн градусов [1]. Это открытие было сделано в том числе с помощью одного из инструментов космического телескопа Хаббл. Основной помехой для астрономических наблюдений в видимой и инфракрасной области спектра является земная атмосфера. В настоящее время существует три основных способа решения данной проблемы: установка телескопов в высокогорных местах с хорошим астроклиматом для уменьшения влияния как атмосферной турбулентности, так и рассеяния и поглощения оптического излучения (пустыня Атакама в Чили, Канарские и Гавайские острова), применение адаптивной оптики либо запуск инструментов в космос. Наиболее известные из запущенных или планируемых к запуску космических телескопов – это телескоп имени Хаббла (1990 г., апертура 2,5 м, зеркало из кварцевого стекла), телескоп Гершеля (2009 г., 3,5 м, карбид кремния), телескоп имени Джеймса Уэбба (планируется к запуску в 2021 г., 6,5 м, бериллий).

Разработчики как космических, так и наземных телескопов стремятся к увеличению апертуры инструментов, которая, прежде всего, определяется диаметром главного зеркала. Ключевым моментом создания больших зеркал является возможность уменьшения массы зеркала при условии сохранения качества и формы поверхности [2]. Более тонкие и легкие зеркала позволяют уменьшить массу оправок и монтажных конструкций, как следствие – уменьшить стоимость всего инструмента. Одним из важнейших следствий уменьшения толщины зеркала является уменьшение его тепловой инерционности, что весьма положительно сказывается на качестве изображения [3].

Важным отличием зеркала космического телескопа от зеркала наземного телескопа является то, что оно изготавливается и контролируется в условиях силы тяготения, а эксплуатируется в условиях невесомости [2]. Ключевыми требованиями для выводимых на орбиту инструментов являются их масса и механическая прочность материалов, из которых они изготавливаются. С точки зрения технологии изготовления важна еще механическая обрабатываемость и хрупкость материала. Традиционные для зеркал больших оптических телескопов материалы – это ситалл СО-115М, церодур и их аналоги [2; 4]. Однако эти материалы уже не могут удовлетворить всем требованиям при создании крупногабаритных зеркал [3; 4]. Поэтому активно ведутся работы по применению новых материалов, наиболее перспективными из которых считаются карбид кремния и бериллий [4]. Отметим, что идея использования карбида кремния для изготовления зеркал была высказана и апробирована еще в середине 1970-х годов [5].

Существует несколько критериев выбора материала для изготовления крупногабаритных зеркал для пассивных оптических систем. Основными из них являются удельная жесткость $\Psi_1 = E / \rho$ (иногда используется термин «механическая добротность») и тепловая добротность $\Psi_2 = \lambda / \alpha \rho C_p$ [4]. Здесь ρ – плотность материала, кг/м³; E – модуль упругости, ГПа; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м · К); α – температурный коэффициент линейного расширения, К⁻¹ (ТКЛР); C_p – удельная теплоемкость, Дж/(кг · К). Чем выше эти критерии, тем лучше подходит материал для применения в качестве основы зеркала. Еще в конце 1950-х годов известный ученый-оптик, разработчик менисковой оптической системы, носящей его имя, Дмитрий Дмитриевич Максудов ввел более общий критерий [6]. Этот критерий позволяет более точно охарактеризовать применимость материала для оптических зеркал и активно используется в оптическом приборостроении. С учетом указанных параметров традиционные оптические материалы типа церодур или астроситалл (ряд стран имеет аналоги данных материалов, известные под различными торговыми марками) заметно уступают новым материалам – карбиду кремния и бериллию. Детальное сравнение материалов будет приведено ниже. Наилучшим соотношением прочностных свойств и плотности обладает бериллий. Однако он имеет большой ТКЛР, что в случае космической оптики приводит к необходимости создания сложной системы терморегулирования. Помимо этого, недостатком бериллия является его токсичность, что затрудняет изготовление зеркала. Хорошим сочетанием физико-механических свойств обладает именно карбид кремния. Однако до последнего времени его широкое применение сдерживала сложность механической обработки, поскольку карбид кремния принадлежит к одним из наиболее твердых материалов в природе [4].

В настоящей работе представлены результаты исследований по получению облегченных подложек для оптических зеркал на основе карбида кремния. Авторам удалось решить ряд ключевых проблем, в том числе и проблему механической обработки, и получить как материал с уникальным для оптических приложений сочетанием свойств, так и разработать методики облегчения подложек, позволившие достигнуть удельных массогабаритных параметров зеркала, сопоставимых с лучшими мировыми аналогами.

Разработанная технология изготовления подложки для зеркала из карбидокремниевой керамики основана на методе шликерного литья. Принципиальный выбор в пользу данного метода формирования подложки зеркала обусловлен рядом факторов, важнейшими из которых являются возможность управления в процессе изготовления количеством и качеством углерода в материале, пористостью материала перед процессом реакционного спекания и, как следствие, управление процессом силицирования (насыщения заготовки кремнием), возможность относительно простого масштабирования изделия, выполнения сложной механической обработки изделия после определенных технологических стадий. Разработанная технология получения карбидокремниевой подложки для зеркала состоит более чем из 20 технологических операций [7–10]. Вначале с использованием первичных микропорошков карбида кремния (85–87 мас. %) и термопластичного связующего путем шликерного литья формируется заготовка. Затем термопластичная связка из детали удаляется термическим способом, в результате чего заготовка становится пористой. Полученная карбидокремниевая матрица пропитывается жидкой фенолформальдегидной смолой, подвергается сушке и последующему низкотемпературному пиролизу и высокотемпературной карбонизации, в результате чего поровое пространство SiC-матрицы частично заполняется углеродом. При этом операции пропитки, сушки, пиролиза и карбонизации могут повторяться несколько раз до достижения требуемого содержания углерода в исходной пористой матрице. В результате такой обработки в матрице образуется наноструктурированный графит с характерной толщиной чешуек в 20–30 нм [11–13]. Финальной стадией формирования подложки является реакционное спекание, когда при нагреве по специально разработанному температурно-временному режиму до температур 1800–1900 °С расплавленный кремний и пары кремния проникают в пористую матрицу и, взаимодействуя с углеродом, образуют вторичный карбид кремния в объеме пор [9]. Именно вторичный карбид кремния связывает в монолитную поликристаллическую структуру получаемый материал. Оставшееся пространство, не занятое карбидом кремния, заполняется свободным кремнием. Одной из основных задач при производстве такого двухкомпонентного Si/SiC композита является получение керамики с высокой плотностью, а также с минимальными пористостью и остаточным содержанием свободного кремния. Подробно технология описана в [7–13], поэтому здесь мы остановимся только на кратком обсуждении ключевых проблем, требовавших решения при создании и совершенствовании данной технологии.

Одна из проблем связана с получением высокоплотной керамики. Для увеличения плотности конечной керамики необходимо подобрать такие фракции коммерчески доступных исходных порошков карбида кремния, которые бы обеспечили наиболее плотную упаковку микрочастиц. Данная задача решалась с помощью предварительного компьютерного моделирования на основе методов молекулярной динамики. В данном случае каждая частица порошка рассматривалась как отдельная «молекула» и вводился модельный потенциал взаимодействия между частицами. После случайного набрасывания необходимого набора частиц в область, имитирующую макроскопический объем материала, решалась задача эволюции совокупности частиц, в результате которой достигалось состояние системы частиц, в котором они не пересекались друг с другом. Для определения наиболее плотной упаковки частиц было выполнено статистическое моделирование, позволившее определить ее параметры (рис. 1). Эти данные были использованы для подготовки шликерной массы.

Другой нетривиальной задачей является удаление парафиновой связки из заготовки после ее отливки. Даже небольшой остаток парафина негативно влияет на последующие операции и качество конечного продукта. Полное термическое удаление связки, осуществленное в защитной атмосфере, приводит к интенсивному осыпанию порошка с поверхности заготовки. Более того, основные дефекты изделия в виде вздутий и трещин возникают именно на этой стадии [9].

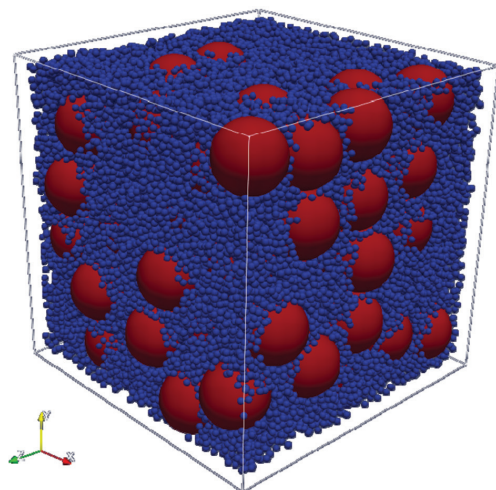


Рис. 1. Пример смоделированной плотной упаковки бинарной смеси монодисперсных микропорошков, состоящих из сферических частиц. Размеры области: $50 \times 50 \times 50$ (относительных единиц). Общее количество частиц 49321. Общая степень заполнения 55 об. %. Соотношение крупных и мелких частиц 1 : 10, соотношение объемных долей фракций 1 : 1,67

Fig. 1. An example of a simulated close packing of a binary mixture of monodisperse micropowders consisting of spherical particles. Dimensions of the area: $50 \times 50 \times 50$ (relative units). The total number of particles is 49321. The total degree of filling is 55 vol. %. The ratio of large and small particles is 1 : 10, the ratio of volume fractions is 1 : 1.67

Проблема была решена также благодаря проведению предварительного математического моделирования нагрева детали в засыпке из минерального мелкодисперсного порошка и определению допустимых скоростей нагрева. Для выполнения такого моделирования потребовались конкретные теплофизические свойства шликерной массы, которые были измерены экспериментально. Связность и механическая целостность детали после процесса удаления связки была достигнута благодаря нагреву детали в окислительной атмосфере. При этом была подобрана такая температура выдержки (600–700 °С), при которой уже начинался процесс поверхностного окисления частиц карбида кремния, но которой еще не было достаточно для образования оксидного слоя заметной толщины. Имеются достаточные основания полагать, что появление тонкого слоя диоксида кремния, выступающего в качестве связующего элемента, обеспечивало сохранность формы и удерживало деталь от рассыпания в конце операции.

Как уже отмечалось выше, важной характеристикой материала для оптических приложений является критерий Максудова, определяемый сочетанием свойств материала. С точки зрения данного критерия лучший для оптических приложений материал должен обладать максимальным коэффициентом теплопроводности и минимальным ТКЛР.

Для целенаправленного улучшения этих теплофизических свойств были предприняты следующие действия. Первый фактор, влияющий на указанные свойства, связан с размерами зерен. С точки зрения процессов теплопереноса наличие более крупных зерен SiC и меньшее количество межзеренных границ должны интенсифицировать процессы теплопереноса. Поэтому при получении шликера использовалась крупная фракция первичного порошка карбида кремния (средний размер 50 мкм, 60–65 мас. %) с небольшим добавлением мелкой фракции (5 мкм, 35–40 мас. %). Размер крупной фракции выбирался как базовый из указанных соображений интенсификации теплопереноса, а размер мелкой фракции и долевое соотношение фракций определялось на основе описанного выше компьютерного моделирования.

Второй фактор связан с межфазными границами. В настоящее время известно, что наличие даже небольшого количества кислорода на межфазных границах в поликристаллическом карбиде кремния приводит к резкому уменьшению макроскопического коэффициента теплопроводности [14]. Так, увеличение концентрации кислорода с 2000 до 3000 ppm в поликристаллической карбидокремниевой керамике уменьшает коэффициент теплопроводности в три раза: со средней величины 200 Вт/(м · К) до 70–80 Вт/(м · К) [15]. Этот эффект объясняется тем фактом, что кислород в поликристаллическом карбиде кремния находится в виде оксидов (прежде всего SiO₂) на границах кристаллов. Оксидные фазы, как правило, обладают низкой теплопроводностью. Поэтому наличие большего количества кислорода создает большее количество тепловых барьеров на границах зерен и, тем самым, замедляет теплоперенос. Развиваемый технологический подход для создания карбидокремниевой керамики позволил учесть и этот фактор. Заготовка в виде пористой матрицы, сформированной первичными частицами карбида кремния, до трех раз пропитывалась фенолформальдегидной смолой и затем подвергалась пиролизу и карбонизации. Пер-

вичный пиролиз проводился при температуре 700 °С в газовой защитной атмосфере (удаление основных летучих компонентов), а высокотемпературная карбонизация при температуре 1200–1800 °С в вакууме. В этих условиях образующийся в порах наноструктурированный углерод является хорошим восстановителем для оксидных структур на границах зерен, а высокая температура, продолжительность процесса (несколько часов) и количество операций обработки способствуют высокой степени восстановления оксидов.

Третий фактор, который влияет на теплопроводность рассматриваемого материала – это соотношение α - и β -фазы карбида кремния в конечном продукте. Известно, что коэффициент теплопроводности β -фазы монокристаллического карбида при комнатных температурах составляет 70–200 Вт/(м · К), в то время как для α -фазы он может достигать 490 Вт/(м · К). β -фаза растет и является более стабильной до температур порядка 2000 °С, α -фаза – при более высоких температурах. Однако четко температурная граница данного перехода между фазами не определена. Поэтому при прочих равных условиях для роста более теплопроводной фазы в материале необходимо увеличить как температуру реакционного спекания, так и длительность выдержки при этой температуре. Это способствует и росту зерен материала, и тем самым также увеличивает интенсивность теплопереноса. В наших экспериментах температура реакционного спекания варьировалась в пределах от 1500 до 1850 °С, а время выдержки при этой температуре достигало 2 ч.

На основе описанной методики были получены как образцы карбидокремниевых материалов, так и карбидокремниевые подложки для зеркал. Характеристики полученного материала приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Характеристики полученного материала Si/SiC

T a b l e 1. Characteristics of the obtained Si/SiC material

Характеристики подложки			Композиционные характеристики			Теплофизические свойства при 20 °С			Механические свойства		
Макс. диаметр, мм	Толщина, мм	Средняя масса на единицу площади, кг/м ²	ρ , г/см ³	Содержание свободного кремния, об. %	Макс. остаточная пористость, %	λ , Вт/(м · К)	α , 10 ⁻⁶ К ⁻¹	C, Дж/(кг · К)	E, ГПа	Микротвердость Н, ГПа	Трещиностойкость K _{IC} , МПа·м ^{1/2}
205	7–14	16,5	3,08–3,13	15–20	2	200	2,1	743	400–440	36	2,9

Результаты рентгенофазного анализа представлены на рис. 2, а зависимость теплофизических свойств материала от температуры – на рис. 3.

Температуропроводность и теплоемкость керамики изучали методом лазерной вспышки на установке LFA-457 Micro Flash фирмы NETZSCH (Германия) в атмосфере аргона в импульсном режиме. Результаты измерений обрабатывали при помощи программного средства Netzsch Proteus LFA Analysis с применением модели Кейпа–Лемона с коррекцией. Данные для ТКЛР были получены на dilatометре DIL 402 Expedis SELECT NETZSCH (Германия) в сканирующем режиме с применением коррективировки по стабилизированному кварцу. Микротвердость материала измерялась с помощью наноиндентора Hysitron TI750 Ubi с использованием пирамиды Берковича. Трещиностойкость с помощью микротвердомера ПМТ-3М (ЛОМО, Россия) с использованием наконечника Виккерса (ГОСТ 9377–81) и атомно-силового микроскопа Dimension FastScan (Bruker, США). Модуль упругости измерялся методом динамического индентирования с помощью индентора ИСУМ-1 (ИПФ НАН Беларуси). Рентгенофазный анализ выполнялся на рентгеновском дифрактометре Rigaku Ultima IV (излучение Cu-K α). Плотность материала определялась методом гидростатического взвешивания.

Отметим, что отдельные работы по материалам на основе карбида кремния проводились в Республике Беларусь и ранее [16–21]. Эти работы относятся как к получению порошков карбида кремния [17], так и монокристаллических [16; 20] и пористых [18] материалов на его основе, композитов с добавлением мелкодисперсных алмазов [19]. Характерный размер образцов монокристаллических материалов, полученных в [16; 20], не превышает 15 мм. В [21] рассматривалось создание стеклокерамической подложки для зеркала, в состав которой входил карбид кремния. Авторами [21] предложено припаивать к поверхности карбидокремниевой подложки лист боросиликатного стекла Vогоfloat-33 толщиной в 2 мм для устранения проблем с пористостью поверхности карбидокремниевой

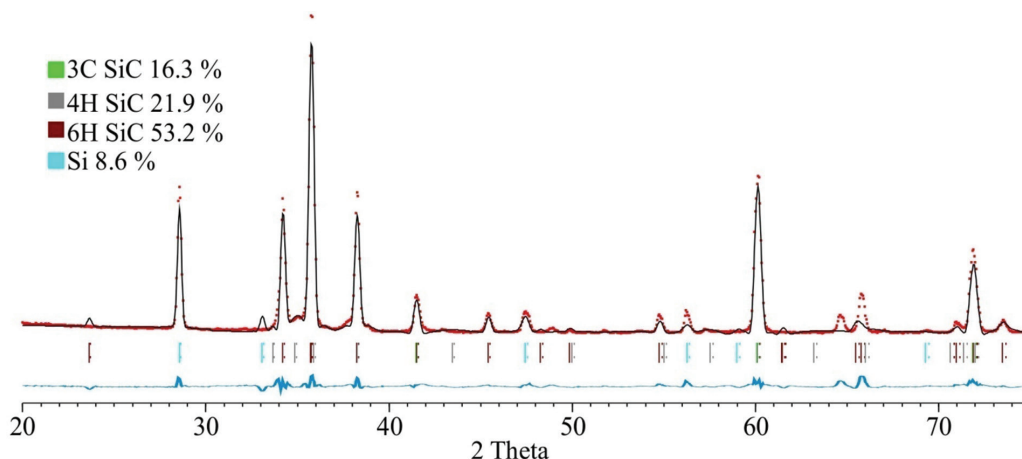


Рис. 2. Данные рентгеновской дифракции (излучение Cu-K α) полученного в работе керамического материала Si/SiC керамика (образец после трех пропиток)

Fig. 2. X-ray diffraction data (Cu-K α radiation) of ceramic material Si/SiC ceramic (sample after 3 impregnations)

подложки. По нашему мнению, в этом случае многие преимущества, которые дает карбид кремния, просто теряются. Например, при размере подложки в 200 мм, перепаде температуры в 50 °C и фактической разнице ТКЛР между стеклом и карбидом кремния $\Delta\alpha \approx 1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ относительная деформация двух слоев составит 20 мкм, или около 30 длин волн. При современных требованиях к среднеквадратическому отклонению формы поверхности зеркала, не превышающему 1/80 длины волны, данная разница (3 порядка величины) не позволит использовать такие комбинированные подложки для создания высокоточных зеркал.

Сравнение полученного авторами материала для подложек оптических зеркал с зарубежными и отечественными аналогами приведено в табл. 2. Можно видеть, что карбид кремния существенно превосходит другие оптические материалы по ряду характеристик. Прежде всего, речь идет о традиционных для телескопостроения материалах типа стеклокерамики церодур, астроситалл, Clear-Ceram, характеризующихся крайне низким температурным коэффициентом линейного расширения. Обладая сравнимой с бериллием удельной жесткостью, карбид кремния превос-

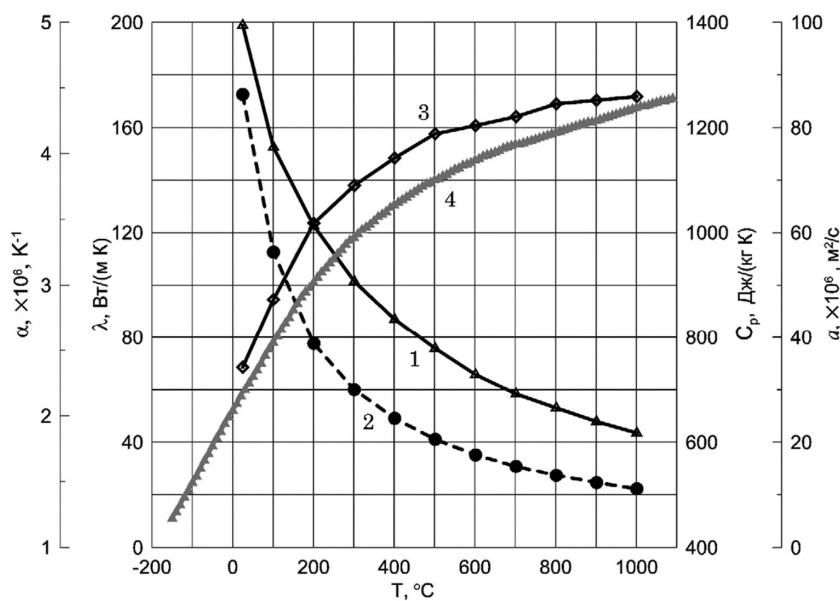


Рис. 3. Зависимость теплофизических свойств полученного материала SiC от температуры: 1 – коэффициент теплопроводности (λ , Вт/(м · К)); 2 – коэффициент температуропроводности (a , м²/с); 3 – теплоемкость (C_p , Дж/(кг · К)); 4 – ТКЛР (α , К⁻¹)

Fig. 3. Dependence of thermophysical properties of the obtained SiC material on temperature: 1 – coefficient of thermal conductivity (λ , W/(m · K)); 2 – coefficient of thermal diffusivity (a , m²/s); 3 – heat capacity (C_p , J/(kg · K)); 4 – CTE (α , K⁻¹)

ходит бериллий почти на порядок по совокупности физико-механических характеристик (критерий Максудова). Наиболее показательно, на наш взгляд, сравнение свойств полученного в данной работе карбидокремниевое материала с аналогичными материалами, получаемыми другими исследовательскими центрами и группами. Как можно видеть, наш материал по механическим характеристикам сопоставим с материалами-аналогами, а по теплофизическим характеристикам превосходит их. По критерию Максудова, который характеризует совокупность механических и теплофизических свойств, полученный материал на ~10 % превосходит материал компании Mersen Voostec (Франция), использовавшийся при создании зеркал миссии Гершель (бюджет 1,4 млрд евро) и Гея (бюджет 1,0 млрд евро), почти в два раза другие зарубежные аналоги и почти в три раза отечественный аналог.

Т а б л и ц а 2. Сравнение свойств полученного карбидокремниевое материала с другими материалами, используемыми для изготовления подложек оптических зеркал

Table 2. Comparison of the properties of the obtained silicon carbide material with other materials used for the production of optical mirror substrates

Параметр	Стеклокерамика Clear-Ceram-Z (Япония)	Бериллий (материал зеркал JWST)	Карбидокремниевая керамика					
			Данная работа, ИТМО-КАССТ SiC/Si	Франция [22]	США [5]	КНР [14]	Япония [23]	Беларусь, ИПМ [21]
ρ , г/см ³	2,55	1,85	3,08–3,13	3,15	3,2	3,09	3,02	2,99
λ (при 25 °С), Вт/(м · К)	1,5	190÷216	200	180	180	161	130	109
α (при 25 °С), $\times 10^{-6}$ К ⁻¹	~ 0,1	11,4	2,1	2,2	4,3	3,5	3,9	4,3
C_p (при 25 °С), Дж/(кг · К)	780	1925	743	700*	700*	594	680	587**
E , ГПа	91	287–303	400–440	420	493	362	400	383–409
E / ρ , $\times 10^6$, Па · м ³ /кг	35	155–164	128–143	133	154	117	132	128–137
Критерий Максудова, Ψ_3 , $\times 10^{12}$, Па · м ² · К/с	0,68	1,6	17,3	15,6	9,2	9,1	6,5	5,9

П р и м е ч а н и я: * – в работе не приведены данные для теплоемкости материала. Поэтому для оценки взято характерное значение для карбида кремния согласно справочной литературы; ** – в [21] приведено, очевидно, некорректное значение теплоемкости, соответствующее 11300 Дж/(кг · К). Оценка получена на основе приведенных в [21] данных о температуропроводности и теплопроводности.

Notes: * – the work has no data on the heat capacity of material. Therefore to estimate, the characteristic value of silicon carbide is taken according to the reference literature; ** – reference [21] contains an incorrect heat capacity value corresponding to 11300 J/(kg · K). The estimate is obtained on the basis of the data on thermal diffusivity and thermal conductivity [21].

Данная работа не была ограничена только получением материала из карбида кремния. Из этого материала были созданы полноценные подложки для зеркала диаметром 205 мм (рис. 4). Отметим, что такой же размер зеркала (208 мм) из карбида кремния использовался в камере LORRY (LONg-Range Reconnaissance Imager) миссии New Horizons, которая в 2017 г. с рекордно близкого расстояния исследовала Плутон и в настоящее время направляется к поясу Койпера. Важно, что предложенный подход позволил проводить механическую обработку полуфабриката подложки на определенных стадиях до реакционного спекания, когда материал имел достаточную механическую прочность для обработки на станке ЧПУ, и в то же время его твердость не была чрезмерной для применения алмазного инструмента. Разработанная технология позволила обрабатывать подложку таким образом, что толщина стенок для ребер структуры облегчения на тыльной части подложки составила всего 2 мм, в отдельных местах ребер структуры облегчения – 1,8 мм (рис. 4, *b*), а толщина основной рабочей поверхности зеркала 3 мм. Это соответствует параметрам обработки лучших мировых аналогов: телескоп Гершеля – толщина стенок 2,5 мм; вторичное зеркало телескопа SOFIA – 2 мм; зеркало фирмы NEC Space Technology – 3 мм [23]. Возможности разработанной технологии в части механической обработки изделий из карбида кремния достаточно наглядно продемонстрированы на рис. 4, *d*. Достигнутые авторами в данной работе точность обработки и свойства полученного материала позволили создать зеркало с удельной массой 16,5 кг/м² (рис. 4, *b*, *c*). Это в настоящее время является одним из лучших мировых показателей по удельной массе зеркал из карбида кремния и характеризует не только и не столько само зеркало, сколько разработанную технологию получения зеркал.

Представляет интерес сравнение характеристик зеркал как различных космических миссий, запущенных в космос, так и созданных в рамках наземной отработки технологии изготовления.

Результаты такого сравнения приведены на рис. 5. Данное сравнение не претендует на абсолютную полноту, но, тем не менее, охватывает большинство значимых проектов в области космического телескопостроения с использованием карбида кремния.

Знаковым и легендарным проектом для рассматриваемой предметной области является миссия телескопа Хаббл. Его главное зеркало, изготовленное еще в 1981 г. из кварцевого стекла, имело массу 828 кг при диаметре 2,4 м (184 кг/м^2). Миссия телескопа имени Уильяма Гершеля, которая стартовала почти через 30 лет, в 2009 г., имела уже телескоп с главным зеркалом из карбида кремния, которое при диаметре 3,5 м характеризовалось массой всего в 260 кг (27 кг/м^2). Использование карбида кремния позволило на порядок уменьшить удельную массу зеркала и совершить тем самым небольшую революцию в создании оптики космического базирования. Технологии создания зеркал на основе оптических стекол продолжали совершенствоваться. Несколько лет назад российской компанией Швабе были изготовлены зеркала из астроситалла метрового размера с удельной массой 50–60 кг/м^2 (рис. 5). Возможно, эти параметры уже близки к предельным характеристикам для данного класса материалов. Поскольку зеркала из астроситалла заметно дешевле сопоставимых по размерам зеркал из карбида кремния, мы полагаем, что в ближайшей перспективе практический интерес будут представлять ультраоблегченные зеркала из карбида кремния с удельной массой менее 30 кг/м^2 .

Для ряда телескопов нам не удалось найти достоверной информации о массе и характеристиках их зеркал из карбида кремния, а именно для зеркала камеры LORRY миссии New Horizons (0,208 м, судя по доступным фотографиям, это зеркало достаточно массивное), для 1,2 м зеркала и самого большого, диаметром 4,03 м, зеркала из созданных в настоящее время (производство Института оптики города Чаньчун, КНР), а также для зеркал миссии ROSETTA и ROCSAT2 (диаметр 0,6 м). Отметим, что на фотографиях самого большого монолитного зеркала как его структура облегчения, так и толщина ребер выглядят заметно массивнее соответствующих структур зеркала телескопа Гершеля.

Свой анализ мы построили на сравнении диаметров и удельных масс зеркал (рис. 5), поскольку удельная масса является интегральным показателем качества материала и уровня технологии его изготовления, и эти характеристики доступны в открытых литературных источниках для большинства созданных зеркал. Приведенные данные позволяют отследить интересную

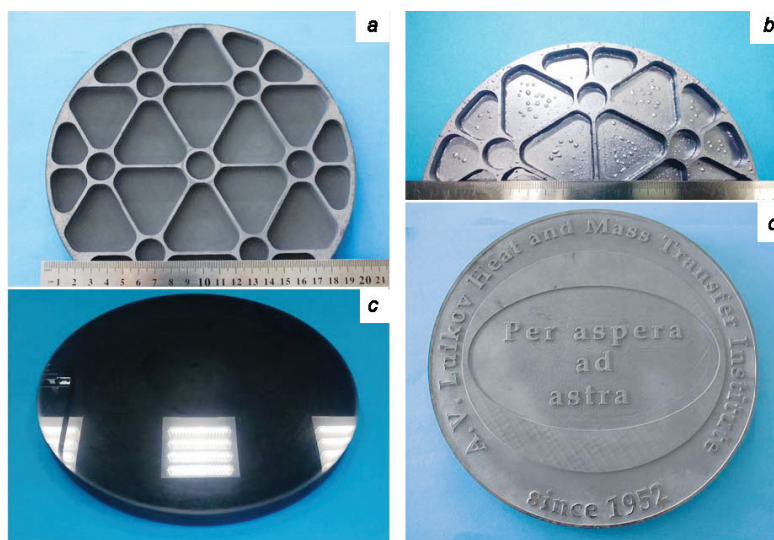


Рис. 4. Образцы полученных подложек зеркал на основе карбида кремния. Диаметр подложки зеркала 205 мм: *a* – вариант структуры облегчения зеркала (тыльная сторона подложки); *b* – структура облегчения непосредственно после реакционного спекания с толщиной ребер 2 мм; *c* – плоская поверхность подложки зеркала после предварительной полировки; *d* – демонстрация возможностей разработанной технологии в части мелкомасштабной механической обработки деталей из карбида кремния

Fig. 4. Samples of the obtained substrates of mirrors based on silicon carbide. The diameter of the mirror substrate is 205 mm: *a* – a version of the structure of the mirror relief (the back side of the substrate); *b* – the structure of relief immediately after reaction sintering with a rib thickness of 2 mm; *c* – flat surface of the mirror substrate after preliminary polishing; *d* – demonstration of the capabilities of the developed technology in terms of small-scale machining of silicon carbide parts

тенденцию. Детальный анализ позволил с определенной степенью условности выделить три группы зеркал из карбида кремния, характеризуемые разной удельной массой зеркал. В группе, обозначенной цифрой 3 на рис. 5, к которой, по нашему мнению, можно отнести зеркала ЛОМО, ALADIN, Gaia, Aperture Os, Harbin Institute of Technology, удельная масса μ (кг/м²) зеркал в зависимости от их диаметра D (мм) приблизительно аппроксимируется степенной зависимостью вида (пунктирная прямая 3)

$$\mu_3 \approx 3,2D^{0,4}.$$

Вторая группа (ALADIN, AKARI, SOFIA, NEC Space Technology) имеет несколько лучшие характеристики, которые могут быть аппроксимированы аналогичной функциональной зависимостью, но уже с другими коэффициентами:

$$\mu_2 \approx 4,6D^{0,3}.$$

Наконец первая группа (Herschel, NEC Space Technology, Changchun Institute of Optics, ECM, ИТМО-КАССТ) обладает наиболее совершенными удельными характеристиками (удельная масса ~ 20 кг/м² и менее при субметровом размере, менее 30 кг/м² при больших размерах). Для этой группы

$$\mu_1 \approx 3,9D^{0,2}.$$

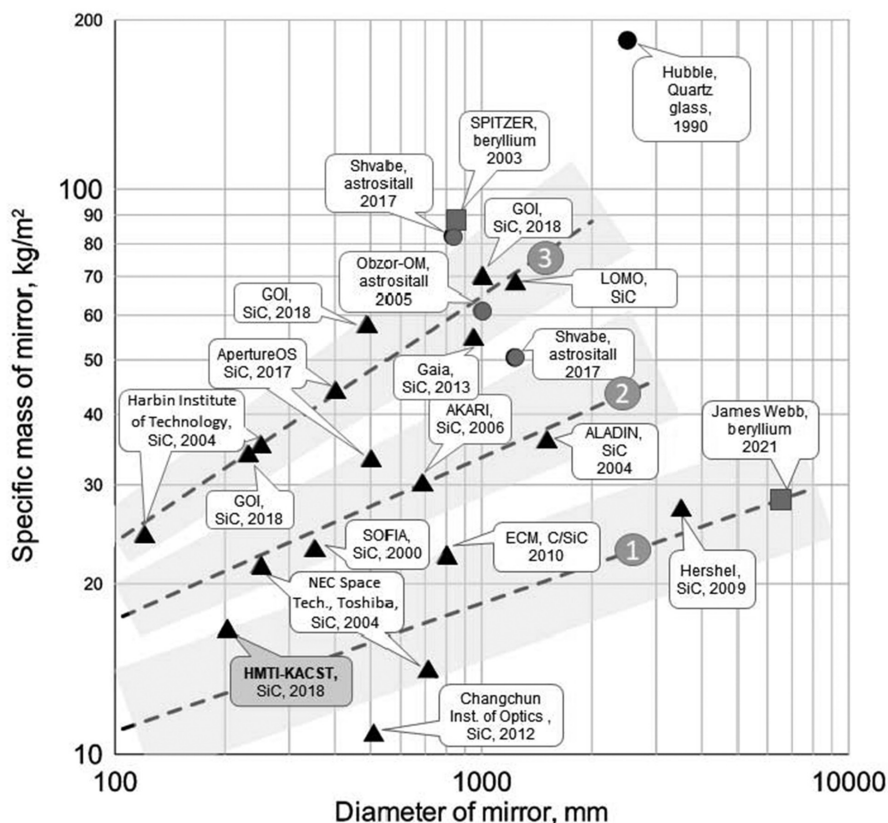


Рис. 5. Сравнение характеристик зеркал для оптики космического базирования, изготовленных в различное время различными компаниями из кварцевого стекла или астроситалла (●), карбида кремния (▲) и бериллия (■). В сравнении представлены зеркала телескопа Гершель; телескопа Хаббл; телескопа Дж. Уэбб; производства компании ECM (Германия, Япония); NEC Space Technology, Toshiba [23]; телескопов аппаратов SOFIA, AKARI (ASTRO-F), ALADIN и миссии Gaia; производства компаний Aperture OS, Швабе, ЛОМО, Государственного оптического института им. С. И. Вавилова; макета спутника Обзор-ОМ; телескопа аппарата Spitzer; производства Технологического института г. Харбин и Института оптики г. Чаньчуня [24]

Fig. 5. Comparison of the characteristics of mirrors for space-based optics, manufactured at different times by various companies of quartz glass or astrosital (●), silicon carbide (▲) and beryllium (■). In comparison, the mirrors of the Herschel telescope are presented; the Hubble telescope; the telescope of J. Webb; manufactured by ECM (Germany, Japan); NEC Space Technology, Toshiba [23]; telescopes of SOFIA, AKARI (ASTRO-F), ALADIN and Gaia missions; production companies Aperture OS, Schwabe, LOMO, State Optical Institute S. I. Vavilov; mock-up of the satellite Obzor-OM; telescope apparatus Spitzer; production of the Harbin Institute of Technology and the Chanchun Institute of Optics [24]

Указанное различие может быть обусловлено рядом факторов. Но определяющими, вполне вероятно, являются технические требования, предъявляемые к каждому конкретному зеркалу, и собственно уровень технологии изготовления. При диаметре зеркал порядка 100 мм, являющимся нижним пределом практически значимого применения, для третьей из обозначенных групп зеркал экстраполяция дает величину удельной массы порядка 23–24 кг/м², для второй – 17–18 кг/м², для первой – 11–12 кг/м². Можно предположить, что последнее значение является оценкой предельной характеристики удельной массы для зеркал из карбида кремния, обусловленной как физическими свойствами материала, так и техническими требованиями, предъявляемыми к зеркалам. Полагаем, что данные зависимости могут быть использованы для оценок при разработке новых проектов карбидокремниевых зеркал.

Таким образом, в данном сообщении изложены результаты разработки технологии создания зеркал на основе карбида кремния. Разработанная технология позволила создать один из лучших материалов для оптических приложений, характеризуемый максимальным из известных в научной и технической литературе, значением критерия Максудова, а также создать подложку для карбидокремниевоего зеркала с одним из лучших показателей по удельной массе, что критически важно для космических приложений.

Благодарности. Авторы выражают благодарность канд. техн. наук С. М. Даниловой-Третьяк за помощь в определении теплофизических свойств материалов, канд. техн. наук Т. А. Кузнецовой за помощь в измерениях микротвердости и коэффициента трещиностойкости материала, а также д-ру техн. наук А. П. Креню и научному сотруднику Т. А. Протасене (ИПФ НАН Беларуси) за помощь в определении модуля упругости материалов и д-ру физ.-мат. наук В. В. Углову (БГУ) за помощь в выполнении рентгенофазного анализа. Работа выполнена при поддержке Научно-технологического центра имени короля Абдул-Азиза (Саудовская Аравия).

Acknowledgements. The authors are grateful to Ph. D. (Engineering) S. M. Danilova-Tretiyak for assistance in determining the thermophysical properties of materials and Ph. D. (Engineering) T. A. Kuznetsova for assistance in measuring microhardness and the coefficient of fracture strength of materials as well as to D. Sc. (Engineering) A. P. Kren and Researcher T. A. Protasena (Institute of Applied Physics of NAS of Belarus) for assistance in determining the elasticity modulus and D. Sc. (Physics and Mathematics) V. V. Uglov (Belarusian State University) for assistance in making the X-ray phase analysis. The work was supported by the King Abdul-Aziz Scientific and Technological Center (Saudi Arabia).

Список использованных источников

1. Fang, T. Missing matter found in the cosmic web / T. Fang // *Nature*. – 2018. – Vol. 558, N 7710. – P. 375–376. <https://doi.org/10.1038/d41586-018-05432-2>
2. Савицкий, А. М. Вопросы конструирования облегченных главных зеркал космических телескопов / А. М. Савицкий, И. М. Соколов // *Оптический журн.* – 2009. – Т. 76, № 10. – С. 94–98.
3. Теребиж, В. Ю. Современные оптические телескопы / В. Ю. Теребиж. – М., 2005. – 80 с.
4. Bely, P. The design and construction of large optical telescopes / P. Bely. – Springer Science & Business Media, 2006.
5. Choyke, W. J. SiC, a new material for mirrors. 1: High power lasers; 2: VUV applications / W. J. Choyke, R. F. Farich, R. A. Hoffman // *Applied Optics*. – 1976. – Vol. 15, N 9. – P. 2006–2007. <https://doi.org/10.1364/ao.15.002006>
6. Максудов, Д. Д. Изготовление и исследование астрономической оптики / Д. Д. Максудов – 2-е изд. – М., 1984. – 272 с.
7. Получение плотной реакционно-связанной керамики на основе карбида кремния / П. С. Гринчук [и др.] // *Тепло- и массоперенос-2017*. – Минск, 2018. – С. 56–68.
8. Effect of technological parameters on densification of reaction bonded Si/SiC ceramics / P. S. Grinchuk [et al.] // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2018. – Vol. 38, N 15. – P. 4815–4823. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2018.07.014>
9. Growth of Silicon Carbide Nanolayers on Contact of Porous Carbon with Molten Silicon / P. S. Grinchuk [et al.] // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. – 2017. – Vol. 90, N 5. – P. 1102–1106. <https://doi.org/10.1007/s10891-017-1663-1>
10. Multistage Technology for Production of Reaction-Sintered Dense Silicon Carbide (Invited Lecture) / P. S. Grinchuk [et al.] // *International Symposium on Innovation in Materials Processing. ISIMP 2017*. – Phoenix Jeju, 2017. – P. 11–12.
11. Synthesis of reaction-sintered silicon carbide ceramics by a two-stage siliconizing method / H. M. Abuhimad [et al.] // *15th Conference & Exhibition of the European Ceramic Society ECerS 2017, July 9–13, 2017*. – Budapest, 2017. – P. 125.
12. Pyrolysis of various carbon precursors inside of porous silicon carbide matrix for reaction-sintered SiC substrates / H. M. Abuhimad [et al.] // *European Advanced Materials Congress EAMC-2017*. – Stockholm; Helsinki, 2017.
13. Formation of the Silicon Carbide Nanographite Ceramic Matrix Composite / P. S. Grinchuk, [et al.] // *The 15th International Symposium on Novel and Nano Materials. ISNNM-2018*. – Lisbon, 2018. – P. 252.
14. Fabrication and test of reaction bond silicon carbide for optical applications / Wang Yao [et al.] // *Transactions of Non-ferrous Metals Society of China*. – 2006. – Vol. 16, N 2. – P. 409–413. [https://doi.org/10.1016/s1003-6326\(06\)60070-8](https://doi.org/10.1016/s1003-6326(06)60070-8)
15. Cho, T. Y. Effect of grain growth on the thermal conductivity of liquid-phase sintered silicon carbide ceramics / T. Y. Cho, Y. W. Kim // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2017. – Vol. 37, N 11. – P. 3475–3481. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2017.04.050>

16. Monolithic nanocrystalline SiC ceramics / B. Matovic [et al.] // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2016. – Vol. 36, N 12. – P. 3005–3010. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2015.10.031>
17. Синтез карбида кремния в электротермическом реакторе с кипящим слоем углеродных частиц / В. А. Боро- дуля [и др.] // *Горение и плазмохимия*. – 2015. – Т. 13, № 2. – С. 92–102.
18. Evaluation of SiC-porcelain ceramics as the material for monolithic catalyst supports / O. Smorygo [et al.] // *Journal of Advanced Ceramics*. – 2014. – Vol. 3, N 3. – P. 230–239. <https://doi.org/10.1007/s40145-014-0114-0>
19. Ковалевский, В. Н. Структурообразование карбидокремниевой матрицы при создании композиции алмаз- карбид кремния / В. Н. Ковалевский // *Огнеупоры и техническая керамика*. – 2005. – № 5. – С. 8–14.
20. Влияние режимов получения реакционно-спеченной керамики на ее структуру и свойства / А. Ф. Ильюшенко [и др.] // *Докл. НАН Беларуси*. – 2017. – Т. 61, № 3. – С. 108–115.
21. Оптические зеркала из композиционных материалов керамика-стекло. Физико-механические и функцио- нальные свойства / А. Ф. Ильюшенко [и др.] // *Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композици- онные материалы, защитные покрытия, сварка. Материалы 13-й междунар. науч.-техн. конф.* – Минск, 2018. – С. 38–41.
22. Bougoin, M. From Herschel to Gaia: 3-meter class SiC space optics / M. Bougoin, J. Lavenac // *Optical Manufacturing and Testing IX: International Society for Optics and Photonics*. – 2011. – Vol. 8126. – P. 81260V.
23. Tsuno, K. Reaction-sintered silicon carbide: newly developed material for lightweight mirrors / K. Tsuno // *5th International Conference on Space Optics: Proc. of SPIE*. – Toulouse, 2004. – Vol. 10568. – P. F-2–F-6.
24. Design and finite element analysis of $\Phi 510$ mm SiC ultra-lightweight mirror / Y. Y. Zhang [et al.] // *Optics and Pre- cision Engineering*. – 2012. – Vol. 20, N 8. – P. 1718–1724. <https://doi.org/10.3788/ope.20122008.1718>

References

1. Fang T. Missing matter found in the cosmic web. *Nature*, 2018, vol. 558, no. 7710, pp. 375–376. <https://doi.org/10.1038/d41586-018-05432-2>
2. Savitskiĭ A. M., Sokolov I. M. Questions of constructing lightened primary mirrors of space telescopes. *Journal of Optical Technology*, 2009, vol. 76, no. 10, pp. 666–669. <https://doi.org/10.1364/jot.76.000666>
3. Terebizh V. Yu. *Modern optical telescopes*. Moscow, 2005. 80 p. (in Russian).
4. Bely P. *The design and construction of large optical telescopes*. Springer Science & Business Media, 2006.
5. Choyke W. J., Farich R. F., Hoffman R. A. SiC, a new material for mirrors. 1: High power lasers; 2: VUV applications. *Applied Optics*, 1976, vol. 15, no. 9, pp. 2006–2007. <https://doi.org/10.1364/ao.15.002006>
6. Maksutov D. D. *Manufacturing and study of astronomical optics*. 2d ed. Moscow, 1984. 272 p. (in Russian).
7. Grinchuk P. S., Kiyashko M. V., Stepkin M. O., Toropov V. V., Akulich A. V., Solovei D. V., Khort A. A., Shashkov M. D., Lyakh M. Yu., Abuhim H. M., Alshahrani M. S. Preparation of dense reaction-bonded ceramics based on silicon carbide. *Teplota i massoperenos–2017 = Heat and Mass Transfer–2017*. Minsk, 2018, pp. 56–68 (in Russian).
8. Grinchuk P. S., Kiyashko M. V., Abuhim H. M., Alshahrani M. S., Stepkin M. O., Toropov V. V., Khort A. A., Solovei D. V., Akulich A. V., Shashkov M. D., Liakh M. Yu. Effect of technological parameters on densification of reaction bonded Si/SiC ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, 2018, vol. 38, no. 15, pp. 4815–4823. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2018.07.014>
9. Grinchuk P. S., Abuhim H. M., Fisenko S. P., Khodyko Yu. A. Growth of Silicon Carbide Nanolayers on Contact of Porous Carbon with Molten Silicon. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2017, vol. 90, no. 5, pp. 1102–1106. <https://doi.org/10.1007/s10891-017-1663-1>
10. Grinchuk, P. S., Abuhim H. M., Alshahrani M. S., Kiyashko M. V., Solovei D. V., Akulich A. V., Stepkin M. O., Khort A. A. Multistage Technology for Production of Reaction-Sintered Dense Silicon Carbide (Invited Lecture). *International Symposium on Innovation in Materials Processing. ISIMP 2017*. Phoenix Jeju, 2017, pp. 11–12.
11. Abuhim H. M., Alshahrani M. S., Grinchuk P. S., Solovei D. V., Stepkin M. O., Akulich A. V., Khort A. A. Synthesis of reaction-sintered silicon carbide ceramics by a two-stage siliconizing method. *15th Conference & Exhibition of the European Ceramic Society*. Budapest, 2017, pp. 125.
12. Abuhim H. M., Alshahrani M. S., Grinchuk P. S., Solovei D. V., Kiyashko M. V., Toropov V. V., Stepkin M. O., Khort A. A. Pyrolysis of various carbon precursors inside of porous silicon carbide matrix for reaction-sintered SiC substrates. *European Advanced Materials Congress*. Stockholm; Helsinki, 2017.
13. Grinchuk P. S., Solovei D. V., Kiyashko M. V., Stepkin M. O., Akulich A. V., Abuhim H. M., Alshahrani M. S. For- mation of the Silicon Carbide Nanographite Ceramic Matrix Composite. *The 15th International Symposium on Novel and Nano Materials*. Lisbon, 2018, pp. 252.
14. Wang Yao, Yu-min Zhang, Jie-cai Han, Hong-bo Zuo. Fabrication and test of reaction bond silicon carbide for optical applications. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2006, vol. 16, no. 2, pp. 409–413. [https://doi.org/10.1016/s1003-6326\(06\)60070-8](https://doi.org/10.1016/s1003-6326(06)60070-8)
15. Cho T. Y., Kim Y. W. Effect of grain growth on the thermal conductivity of liquid-phase sintered silicon carbide cera- mics. *Journal of the European Ceramic Society*, 2017, vol. 37, no. 11, pp. 3475–3481. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2017.04.050>
16. Matović B., Bučevac D., Urbanović V., Stanković N., Daneu N., Volkov-Husović T., Babić B. Monolithic nanocrys- talline SiC ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, 2016, vol. 36, no. 12, pp. 3005–3010. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2015.10.031>
17. Borodulya V. A., Vinogradov L. M., Grebenkov A. Zh., Mikhailov A. A. Synthesis of silicon carbide in electrothermal reactor with fluidized bed of carbon particles. *Gorennyye i plazmokhimiya [Combustion and Plasma Chemistry]*, 2015, vol. 13, no. 2, pp. 92–102 (in Russian).

18. Smorygo O., Marukovich A., Mikutski V., Sadykov V. Evaluation of SiC-porcelain ceramics as the material for monolithic catalyst supports. *Journal of Advanced Ceramics*, 2014, vol. 3, no. 3, pp. 230–239. <https://doi.org/10.1007/s40145-014-0114-0>
19. Kovalevskiy V. N. Structural formation of a carbide-silicon matrix in the creation of a diamond-carbide silicon composition. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika = Refractories and technical ceramics*, 2005, no. 5, pp. 8–14 (in Russian).
20. Ilyushchenko A. Ph., Zvonarev E. V., Vitko Zh. A., Osipov V. A., Babura D. V. Influence of the modes production of reactive-sintered carbide ceramics on the structure and properties. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2017, vol. 61, no. 3, pp. 108–115 (in Russian).
21. Il'yushchenko A. F., Osipov V. A., Zvonarev E. V., Babura D. V. Optical mirrors made of ceramic-glass composites. Physico-mechanical and functional properties. *Novyye materialy i tekhnologii: poroshkovaya metallurgiya, kompozitsionnyye materialy, zashchitnyye pokrytiya, svarka. Materialy 13-y mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii [New materials and technologies: powder metallurgy, composite materials, protective coatings, welding. Materials of the 13th International Scientific and Technical Conference]*. Minsk, 2018, pp. 38–41 (in Russian).
22. Bougoin M., Lavenac J. From Herschel to Gaia: 3-meter class SiC space optics. *Optical Manufacturing and Testing IX. International Society for Optics and Photonics*, 2011, vol. 8126, p. 81260V.
23. Tsuno K. Reaction-sintered silicon carbide: newly developed material for lightweight mirrors. *5th International Conference on Space Optics*. Toulouse, 2004, vol. 10568, pp. F-2–F-6.
24. Zhang Y. Y., Jing W., Cheng Y., Hu G., Fang J.-Z. Design and finite element analysis of $\Phi 510$ mm SiC ultra-light-weight mirror. *Optics and Precision Engineering*, 2012, vol. 20, no. 8, pp. 1718–1724. <https://doi.org/10.3788/ope.20122008.1718>

Информация об авторах

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

Абухимд Хатем – канд. хим. наук, заведующий лабораторией. Национальный нанотехнологический исследовательский центр (Эр-Рияд, 11442, аб. ящик 6086, Саудовская Аравия). E-mail: habuhimd@kacst.edu.sa.

Акулич Андрей Владимирович – науч. сотрудник. Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: akulich.av@mail.ru.

Кияшко Михаил Викторович – науч. сотрудник. Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: manilmsteen@tut.by.

Соловей Дмитрий Владимирович – канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник. Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: solovei@hmti.ac.by.

Стёпкин Михаил Олегович – инженер-технолог. Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: serpent_83@tut.by.

Торопов Виктор Владимирович – канд. техн. наук, вед. науч. сотрудник. Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь).

Шашков Михаил Дмитриевич – инженер-технолог. Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь).

Хорт Александр Александрович – канд. техн. наук, науч. сотрудник. Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: khort.alexander@gmail.com.

Лях Мария Юрьевна – канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник. Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: liakhmaria@gmail.com.

Information about the authors

Grinchuk Pavel Semenovich – Corresponding Member, D. Sc. (Physics and Mathematics), Head of the Department. 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: gps@hmti.ac.by.

Abuhimd Hatem – Ph. D. (Chemistry), Head of the Laboratory. National Nanotechnology Research Center King Abdulaziz City for Science and Technology (Riyadh, 11442, P.O. Box 6086, Saudi Arabia). E-mail: habuhimd@kacst.edu.sa.

Akulich Andrei Vladimirovich – 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: akulich.av@mail.ru.

Kiyashko Mikhail Viktorovich – 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: manilmsteen@tut.by.

Solovei Dmitry Vladimirovich – Ph. D. (Engineering), Senior 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: solovei@hmti.ac.by.

Stepkin Mikhail Olegovich – Processing engineer. 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: serpent_83@tut.by.

Toropov Victor Vladimirovich – Ph. D. (Engineering), Leading 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).

Shashkov Mikhail Dmitrievich – Processing engineer. 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).

Khort Aleksandr Aleksandrovich – Ph. D. (Engineering), 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: khort.alexander@gmail.com.

Liakh Maria Yurievna – Ph. D. (Physics and Mathematics), 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: liakhmaria@gmail.com.

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

УДК 621.691
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-2-235-241>

Поступило в редакцию 19.03.2018
Received 19.03.2018

Н. А. Руденская

*Институт повышения квалификации Белорусского национального технического университета,
Минск, Республика Беларусь*

УЛЬТРАДИСПЕРСНОЕ УПРОЧНЕНИЕ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ МИКРОКОМПОЗИТОВ И ПОКРЫТИЙ, СОДЕРЖАЩИХ БОРИДЫ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ, В ПОТОКЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ

(Представлено членом-корреспондентом Ф. И. Пантелеенко)

Аннотация. Представлены результаты расширенных исследований процессов модифицирования морфологии, состава и структуры полидисперсных тугоплавких порошков и микрокомпозитов на основе CrB_2 , TiB_2 , TiCrB_2 , Al_2O_3 в потоке низкотемпературной плазмы и использования этих материалов для формирования плазменных покрытий – слоевых композитов.

Ключевые слова: плазма, микрокомпозиты, покрытия, неравновесное состояние, состав, структура, сфероидизация, металлизация, конгломерация, ультрадисперсное упрочнение, тугоплавкие бориды

Для цитирования. Руденская, Н. А. Ультрадисперсное упрочнение металлокерамических микрокомпозитов и покрытий, содержащих бориды переходных металлов, в потоке низкотемпературной плазмы / Н. А. Руденская // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2019. – Т. 63, № 2. – С. 235–241. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-2-235-241>

Natalia A. Rudenskaya

Institute of Improvement of Qualification of the Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

ULTRADISPERSED HARDENING OF METAL-CERAMIC MICROCOMPOSITES AND COATINGS CONTAINING BORIDES OF TRANSITION METALS IN A LOW-TEMPERATURE PLASMA FLOW

(Communicated by Corresponding Member Fedor I. Panteleenko)

Abstract. The results of extended researches of processes of modification of morphology, composition and structure of polydispersed refractory powders and microcomposites based on CrB_2 , TiB_2 , TiCrB_2 , Al_2O_3 in the flow of low-temperature plasma and its use for the formation of plasma coatings – layered composites are presented.

Keywords: plasma, microcomposite, coating, non-equilibrium state, the composition, structure, spheroidization, metallization, conglomeration, ultrafine hardening, refractory borides

For citation: Rudenskaya N. A. Ultradispersed hardening of metal-ceramic microcomposites and coatings containing borides of transition metals in a low-temperature plasma flow. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2019, vol. 63, no. 2, pp. 235–241 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-2-235-241>

Введение. Плазменные методы получения полидисперсных микрокомпозитов (плакированных, конгломерированных, с использованием тугоплавких компонентов, с одновременной сфероидизацией и импульсным делением) и слоевых композитов – это способы формирования метастабильного состояния вещества. Изучение неравновесного состояния материалов имеет большое значение при создании дисперсно-упрочненных композитов, отличающихся необычными свойствами. Основным моментом в этих исследованиях является комплексное изучение генезиса исходный порошок → плазменные микрокомпозиты → плазменное покрытие.

Цель исследования состояла в наиболее полном и последовательном изучении процессов, влияющих на структуру и свойства материалов при переходе из состояния исходного порошка в микрокомпозиты и далее в слоевой композит под воздействием низкотемпературной плазмы.

Научная новизна работы состоит в использовании новых научных и технологических подходов (в том числе импульсного деления сфероидов в плазменном потоке) к формированию

ультрадисперсных структур в поверхностных слоях плазменных микрокомпозитов и в матричном сплаве металлокерамических слоистых композитов – перспективных материалов для машиностроения, авиации, оборонной техники и других отраслей промышленности. Новизна приведенных результатов подтверждена патентами¹.

Материалы и методы исследования. В качестве исходных материалов для создания микрокомпозитов и слоистых композитов использовали порошки тугоплавких соединений CrB_2 , TiB_2 , TiCrB_2 , Al_2O_3 дисперсностью (–20), 20–40, 40–50, 50–63, 63–71, 71–100 мкм и металлические (Ni, Co) дисперсностью менее 4 мкм. Композиции готовили в виде механических смесей и конгломератов. Обработку композиций проводили в потоке плазмы дозвукового и сверхзвукового плазматронов. Подачу порошков в плазменный поток осуществляли из одного и двух бачков-питателей. При нанесении покрытий в качестве основного материала использовали порошок самофлюсующегося сплава марки ПГ-10К-01.

Микроструктуру покрытий изучали металлографическим (Neophot-21) и микрорентгено-спектральным (LEO 1455 VP) методами. Рентгеновский фазовый анализ проводили на трансмиссионном дифрактометре Stadi P в $\text{CuK}\alpha$ излучении с использованием порошкообразных стандартов JCPDS-ICDD.

Результаты и их обсуждение. На начальной стадии исследований при обработке в плазме порошковых композиций необходимо было выявить основные процессы, протекающие в плазменном потоке, как при получении порошков, так и при их напылении.

На рис. 1 показана схема этих процессов при модифицирующей обработке порошков в виде механических смесей и конгломератов. Из рис. 1 следует, что механические смеси порошков подвержены в плазменном потоке оплавлению, сфероидизации, металлизации, конгломерации. Частицы конгломератного типа оплавляются, далее проходят стадии сфероидизации, измельчения и металлизации.

Остановимся на основных структурных и морфологических характеристиках порошков, предназначенных для газотермического напыления покрытий.

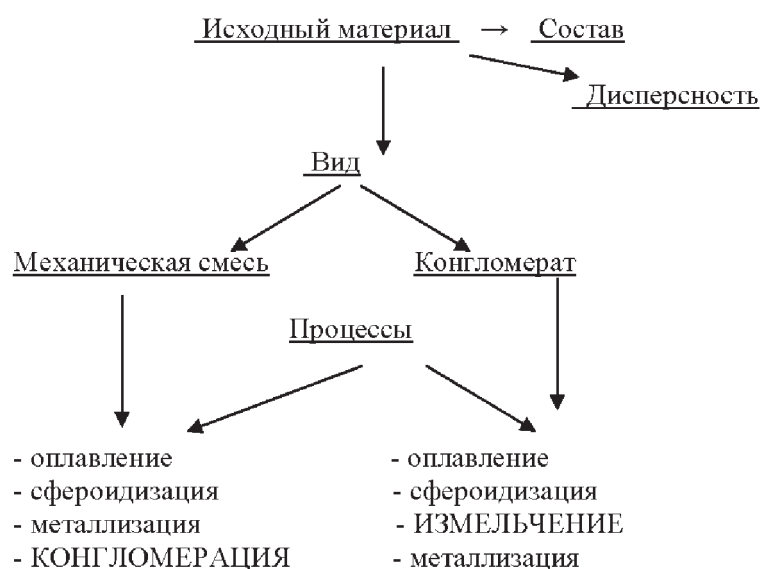


Рис. 1. Схема процессов, реализующихся при обработке тугоплавких порошков в плазменном потоке

Fig. 1. The scheme of processes occurring during the treatment of refractory powders in the plasma flow

¹ Порошок для газотермических покрытий: пат. 11196 Респ. Беларусь / Н. А. Руденская, Ю. Г. Алексеев, В. А. Неронов, В. А. Гулецкий; дата публ.: 30.10.2008; Плакированный порошок для газотермических покрытий: пат. 15973 Респ. Беларусь / Н. А. Руденская, В. С. Нисс, М. В. Руденская; дата публ.: 30.06.2012; Способ нанесения износостойкого покрытия: пат. 2578872 РФ / Г. П. Швейкин, Н. А. Руденская, В. Я. Фролов, М. В. Руденская, В. И. Кузьмин; дата публ.: 27.03.2016.

Интенсивность конгломерации порошков. Исходя из результатов сравнительных исследований обработки в плазменном потоке механических смесей и порошков конгломератного типа, можно отметить следующее: главным отличием является то, что в первом варианте частицы порошков укрупняются, а во втором – измельчаются. Укрупнение частиц происходит после металлизации благодаря расплавленной лакирующей оболочке. Измельчение конгломератов обнаружено после сфероидизации частиц. А, как было показано ранее [1], измельчение частиц, прошедших стадию сфероидизации, протекает по механизму импульсного деления сфероидов.

Установлено влияние состава исходного материала на выход конгломерированных частиц. Так, увеличение содержания металлической составляющей в композиции до 40 мас. % приводит к возрастанию количества частиц конгломератного типа в конечном продукте до 24–38 %. Кроме того, размер частиц существенно влияет на выход конгломератов: от 3 до 14 % в случае изменения дисперсности исходного порошка тугоплавкой составляющей от 40–63 до 30–40 мкм.

Влияние изменения состава тугоплавкой составляющей на интенсивность конгломерации порошков показано на композициях с диборидами хрома и титана. Использование исходного порошка в виде механической смеси диборид хрома–никель при варьировании дисперсности тугоплавкого компонента позволяет получить до 47 % частиц конгломератного вида в конечном продукте. В композиции диборид титана–никель максимальное содержание частиц конгломератного типа составляет 23 % при исходной дисперсности тугоплавкой составляющей менее 20 мкм. Главным условием образования частиц-конгломератов является хорошее смачивание металлической составляющей тугоплавких частиц. Диборид титана характеризуется большими значениями углов смачивания никелем в сравнении с диборидом хрома, однако процесс конгломерации для фракции менее 20 мкм удастся реализовать. Это можно объяснить, по-видимому, формированием механических конгломератов в подводных порошков коммуникациях и при приготовлении механических смесей порошков. В таких механических конгломератах, где никеля присутствует больше, чем тугоплавких частиц, никель впоследствии расплавляется и удерживает частицы диборида титана, такие плазменные конгломераты не рассыпаются и имеют овальную или сферическую форму. Надо отметить, что и процентное содержание тугоплавкой составляющей в таких конгломератах ниже, чем в исходной композиции. С изменением размера частиц тугоплавкой составляющей в виде диборида титана до 40–50 мкм процесс конгломерации прекращается, в данном случае из-за недостаточного смачивания металлической составляющей тугоплавких частиц.

Самый большой выход конгломерированных частиц получен на композициях с тугоплавкой составляющей в виде диборида хрома.

Изучение интенсивности конгломерации порошков на различных композициях материалов очень важно для выявления возможности синтеза порошков конгломератного типа с целью создания из них газотермических покрытий с высокими эксплуатационными свойствами, что обусловлено формированием микрокомпозитов в плазменном потоке с одновременным измельчением их структуры.

Эффективность сфероидизации порошков. В таблице показано изменение эффективности сфероидизации порошков из боридо-оксидной композиции от их дисперсности. Полидисперсная система была приготовлена из одинакового количества порошков всех фракций и характеризуется минимальным выходом сферического продукта (относительно фракций менее 80 мкм). Хотя это был и ожидаемый результат, но здесь важно иметь информацию количественную, так как в промышленных партиях порошков такие характеристики, как гранулометрический состав по фракциям и тем более степень сфероидизации отсутствуют. Такого вида диаграммы с показателем выхода сферического продукта весьма информативны для операторов напыления покрытий. Кроме того, проведенные исследования показали существенное влияние состава композиции на степень сфероидизации частиц: введение в исходный состав диборида титана уменьшает выход сферического продукта на 14–35 % (таблица, рис. 2). Аналогичные результаты получены и на композициях с боридами, когда варьировали состав основы и добавки (либо к дибориду хрома добавляли диборид титана, либо наоборот). Рис. 2 отражает результаты эксперимента со следующими композициями: использование диборида титана в качестве добавки к дибориду хрома

приводит к снижению степени сфероидизации на 20–27 %; изменение состава композиции, когда в качестве основного компонента использовали диборид титана, а в качестве добавки – диборид хрома, существенно повлияло на рассматриваемую характеристику и отличие ее для двух видов материалов составило от 7 до 26 %.

Зависимость степени сфероидизации порошков от их дисперсности
The dependence of the degree of spheroidizing of powders from their dispersion

Дисперсность, мкм Dispersity, μm	Эффективность сфероидизации, % Spheroidization efficiency, %
CrB ₂ -оксид	
10–50	97
30–60	84
40–80	68
10–100	40
60–100	23
CrB ₂ -TiB ₂ -оксид	
10–50	63
30–60	51
40–80	38
10–100	19
60–100	5

Степень металлизации порошков. Следующая характеристика структуры частиц порошков применима только к плакированным микрокомпозитам. Известно [2], что процесс металлизации (плакирования) достаточно сложный и многофакторный и определяется не только режимными параметрами, размером и составом тугоплавких материалов, но и размером и составом материала оболочки, способом ввода частиц в плазменный поток, вида исходной композиции.

Способ подачи порошков в плазменный поток – чрезвычайно важный момент в процессе металлизации, поскольку именно распределение компонентов определяет количество того или иного материала в композиции. Обычно принято готовить механические смеси порошков тугоплавкой и металлической составляющих и эти смеси подают в плазменный поток [2; 3], в высокотемпературной зоне плазменной струи металлические частицы испаряются, а тугоплавкие сфероидизируются и далее в холодной зоне плазменной струи металлический пар конденсируется на готовые центры кристаллизации – тугоплавкие частицы. Проводили также исследования по использованию двух бачков-питателей, ранее было показано [3], что такой вариант транспортировки порошков в плазменный поток позволяет повысить выход металлизированного продукта, идея состояла в раздельной подаче металлических и тугоплавких частиц для предотвращения

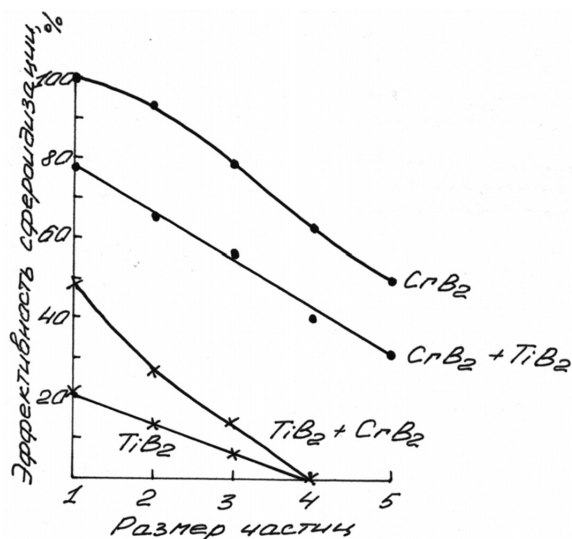


Рис. 2. Зависимость степени сфероидизации порошков от их состава и дисперсности (1 – дисперсность (–20 мкм); 2 – 20–40 мкм; 3 – 40–50 мкм; 4 – 50–63 мкм; 5 – 63–80 мкм)

Fig. 2. The dependence of the degree of spheroidizing of powders, their composition and dispersion (1 – dispersion (–20 μm); 2 – 20–40 μm ; 3 – 40–50 μm ; 4 – 50–63 μm ; 5 – 63–80 μm)

образования механических конгломератов в подводящих порошок коммуникациях; таким образом заранее формировали металлический пар, в который подавали сфероидизированные тугоплавкие частицы. Однако эти исследования относятся к разряду единичных.

В данной части работы представлены результаты расширенных исследований по использованию двух бачков-питателей с целью создания условий металлизации из заранее сформированного рабочего пара. Эксперименты проводили на порошках различных фракций двух составов (композиция без диборида титана и композиция с диборидом титана). На рис. 3 показаны результаты металлизации при использовании одного и двух бачков-питателей. Из рис. 3 следует, что использование двух бачков-питателей для отдельной подачи компонентов позволяет повысить выход металлизированных частиц на 4–21 %.

Здесь следует отметить и такой момент, что одновременно с металлизацией в порошковых композициях наблюдается образование конгломератов. Этот процесс наиболее интенсивно проходит в полидисперсных системах, что можно объяснить различной степенью нагрева таких частиц и различной их скоростью, таким образом, создаются благоприятные условия для их столкновения в плазменном потоке в сравнении с монодисперсными композициями.

Если рассматривать свойства металлизированных частиц, то основными их характеристиками являются сплошность оболочек, их толщина и адгезионная прочность с тугоплавким ядром.

Проведены исследования плакирующих слоев на моно- и полидисперсных системах при оптимальных содержаниях плакирующей составляющей и режимных параметрах плазмотрона. Установлено, что на всех композициях с увеличением размера тугоплавких частиц толщина оболочек уменьшается. Следует обратить внимание на то, что толщина плакирующего слоя на частицах монодисперсных фракций в среднем более чем на 2 мкм больше, чем на частицах такого же размера полидисперсных композиций. Например, если для частиц фракции 63–71 мкм монодисперсной композиции толщина оболочки составляет в среднем 2,1 мкм, то в полидисперсной системе толщину плакирующего слоя измерить не удалось. Это очень существенный момент, так как в большинстве вариантов напыления плазменных покрытий используют фракции 40–50, 50–63, 63–71 мкм, а толщину плакирующих слоев задают по минимальному значению, чтобы обеспечить определенный уровень когезии покрытия при сохранении свойств тугоплавкой составляющей.

Перейдем к оценке состава плакирующих слоев. Рассмотрим композицию TiB_2-CrB_2-Ni в виде порошка, плакированного никелем, в сравнении с напыленным и оплавленным плазменным покрытием, в котором плакированный порошок использовали в качестве упрочняющей добавки. Основным компонентом оплавляемого покрытия был выбран самофлюсующийся сплав ПГ-10К-01. Состояние границы раздела борид–плакирующий слой оценивали по интенсивности взаимодействия этих компонентов. Рентгенофазовый анализ показал, что и в плакированных

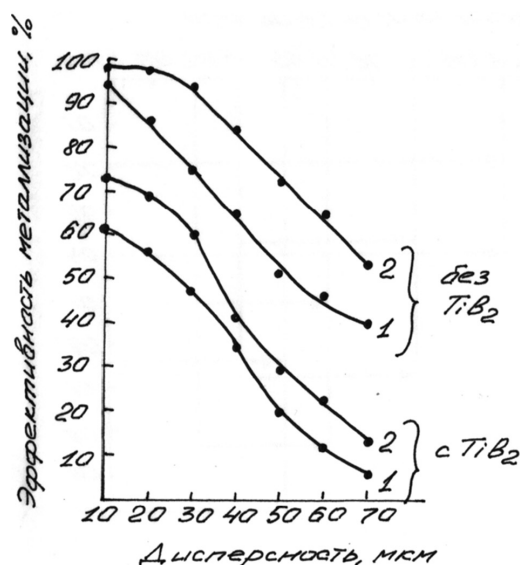


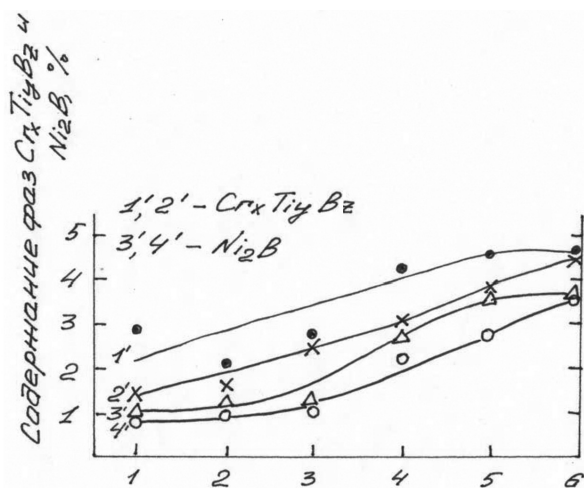
Рис. 3. Влияние вида подачи порошков в плазменный поток на эффективность металлизации:
1 – совмещенная подача; 2 – отдельная подача

Fig. 3. The influence of the flow of powder in plasma flow on the efficiency of plating:
1 – combined flow; 2 – separate flow

частицах, и в покрытиях присутствует фаза $\text{Cr}_x\text{Ti}_y\text{B}_z$. Наиболее вероятный стехиометрический состав этой фазы следующий: $\text{Cr}_{0,5}\text{Ti}_{0,5}\text{B}_2$. Кроме того, в плакированном продукте обнаружена фаза никелевого борида Ni_2B . Известно [3], что на границе раздела тугоплавких ядер с плакирующей оболочкой формируются диффузионные зоны. Это происходит по причине интенсивного нагрева частиц тугоплавких порошков в высокотемпературной зоне плазменного потока, о чем свидетельствует стадия их сфероидизации. При дальнейшей конденсации металлического пара на поверхность таких сфероидов металл растекается по поверхности сфероидов и именно в этот момент создается возможность реализации диффузионных процессов на границе керамической частицы с металлической оболочкой. Лимитирующим фактором в данном процессе является угол смачивания металлом поверхности сфероидизированных частиц. Исходя из полученных результатов фазового состава плакированных микрокомпозитов, можно сделать вывод о том, что сложный борид и никелевый борид сформировались именно на границе раздела тугоплавкое ядро–плакирующая составляющая. И оболочка представляет собой двухслойный композит: первый слой состоит из сложного борида $\text{Cr}_x\text{Ti}_y\text{B}_z$, а второй – из никелевого борида Ni_2B и никеля. Изучение влияния состава исходных композиций и способа обработки на количество фаз $\text{Cr}_x\text{Ti}_y\text{B}_z$ и Ni_2B позволило выявить следующее. Эти фазы обнаружены как в микрокомпозитах, так и в покрытиях.

Остановимся на особенностях формирования сложного борида. Увеличение содержания тугоплавкой составляющей в виде диборида титана в исходном материале приводит к росту количества сложного борида и в плакированных порошках, и в покрытиях из них (рис. 4). Сравнительный анализ фазового состава этих материалов показал, что при переходе от дисперсного материала к плазменным покрытиям количество сложного борида снижается. На данном уровне исследований объяснить полученные результаты достаточно сложно. Можно лишь высказать предположение, что это обусловлено некоторым смещением массы плакирующего слоя от лобовой к хвостовой области частиц в процессе их напыления, при этом происходит модифицирование состава плакирующей оболочки, также в контакте с плазмой могут интенсивно окисляться и титан, и бор. Такое смещение массы плакирующего слоя от лобовой к хвостовой области частиц и даже его полное сворачивание в хвостовой зоне частиц при их напылении было зафиксировано в [3; 4]. Эти результаты были получены при использовании тугоплавких порошков, плакированных как электролитическим методом [4], так и в условиях низкотемпературной плазмы [3]. Результаты, полученные при исследовании содержания боридов никеля в рассматриваемых композициях, представлены на рис. 4.

Здесь надо отметить важную особенность фазообразования никелевых боридов Ni_2B , Ni_3B : во всех оплавленных покрытиях из самофлюсующихся сплавов присутствуют никелевые бориды, их появление обусловлено взаимодействием бора и никеля, содержащихся в самофлюсующихся сплавах. Поэтому в оплавленном покрытии достаточно сложно разделить состав материала



Увеличение содержания диборида титана в композициях от 1 до 5

Рис. 4. Зависимость содержания количества фаз $\text{Cr}_x\text{Ti}_y\text{B}_z$ и Ni_2B от вида ($1'$ и $3'$ – микрокомпозиты; $2'$ и $4'$ – покрытия), состава композиции и типа плазмотрона: $1-5$ – дозвуковой, 6 – сверхзвуковой (при таком же содержании диборида титана, как и в композиции № 5)
Fig. 4. The dependence of the content of the number of phases $\text{Cr}_x\text{Ti}_y\text{B}_z$ and Ni_2B from ($1'$ and $3'$ – microcomposite; $2'$ and $4'$ – coating), the composition and type of torch: $1-5$ – subsonic, 6 – supersonic (with the same content of titanium diboride, as in composition no. 5)

основы – самофлюсующегося сплава и упрочняющего компонента. В связи с чем в качестве промежуточных материалов в данной работе использовали неоплавленные покрытия, чтобы провести сравнительный анализ с исходным порошком, исключив при этом влияние термической обработки (оплавления) напыленных слоев.

Особый интерес представляет сравнение покрытий, полученных напылением дозвуковым и сверхзвуковым плазмотронами. На рис. 4 результаты, полученные при исследовании покрытий, сформированных сверхзвуковой плазмой, соответствуют б. По содержанию обеих промежуточных фаз данные покрытия отличаются от слоев, сформированных дозвуковой плазмой, и соответствуют содержанию этих фаз в исходных плакированных частицах, что объясняется более высокой скоростью плазменного потока и меньшим нагревом частиц, позволяющими перевести частицы в напыленный слой с минимальным видоизменением фазового состава плакирующего слоя. Эти результаты служат подтверждением высказанного предположения о модифицировании состава плакирующей оболочки в процессе ее смещения при использовании дозвукового плазмотрона.

Заключение. Впервые синтезированы оболочковые микрокомпозиаты, содержащие тугоплавкие бориды и отличающиеся высокими качеством, эффективностью сфероидизации и металлизации; проведены комплексные исследования генезиса исходный порошок → микрокомпозиаты (плакированные частицы) → напыленный слой и выявлены особенности самоорганизации микроструктуры вблизи границы раздела матричный сплав–плакированное включение; получены слоевые композиаты, содержащие бориды переходных металлов, с использованием сверхзвукового плазмотрона.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Министерства образования Республики Беларусь по гранту 2.02 (программа «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограмма 2 «Нanomатериалы и нанотехнологии», № 20170230). Автор благодарна канд. техн. наук А. В. Новоселову за помощь при напылении покрытий сверхзвуковым плазмотроном.

Acknowledgments. The work was supported by the Ministry of Education of the Republic of Belarus grant 2.02 (a program of “Physical Material Science, New Materials and Technologies”, sub-programme 2 “Nanomaterials and Nanotechnology”, no. 20170230). The author is grateful to Ph. D. (Engineering) A. Novoselov for help with the spraying of coatings with supersonic plasmatron.

Список использованных источников

1. Импульсное деление плазменных сфероидов / Н. А. Руденская [и др.] // Докл. Акад. наук. – 2009. – Т. 429, № 1. – С. 76–78.
2. Смирнов, А. И. Разработка и исследование плазменного процесса получения металлизированных порошков для жаростойких металлокерамических материалов: дис. ... канд. техн. наук / А. И. Смирнов. – М., 1981. – 169 с.
3. Руденская (Клинская), Н. А. Разработка нового класса композиционных порошков и многофункциональных газотермических покрытий на основе соединений $Al_{III-VI}B_2$: дис. ... д-ра техн. наук / Н. А. Руденская (Клинская). – Екатеринбург, 2000. – 482 с.
4. Газотермическое напыление композиционных порошков / А. Я. Кулик [и др.]. – Л., 1985. – 199 с.

References

1. Rudenskaya N. A., Sokolova N. V., Rudenskaya M. V., Shveikin G. P. Pulse division of plasma spheroids. *Doklady Chemistry*, 2009, vol. 429, no. 1, pp. 294–296. <https://doi.org/10.1134/s001250080911010x>
2. Smirnov A. I. *Development and investigation of plasma process of obtaining metallic powders for heat-resistant metal materials*. Moscow, 1981. 169 p. (in Russian).
3. Rudenskaya (Klinskaya) N. A. *Development of a new class of multifunctional composite powders and thermal spray coatings based on compounds of $Al_{III-VI}B_2$* . Yekaterinburg, 2000. 482 p. (in Russian).
4. Kulik A. Ya., Borisov Yu. S., Mnukhin A. S., Nikitin M. D. *Thermal spraying of composite powders*. Leningrad, 1985. 199 p. (in Russian).

Информация об авторе

Руденская Наталья Александровна – д-р техн. наук, гл. науч. сотрудник. Институт повышения квалификации БНТУ (Партизанский пр., 77, 220107, Минск, Республика Беларусь). E-mail: rugraf2000@mail.ru.

Information about the author

Rudenskaya Natalia Alexandrovna – D. Sc. (Engineering), Chief researcher. Institute of Improvement of Qualification of the Belarusian National Technical University (77, Partizansky Ave., 220107, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: rugraf2000@mail.ru.

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

СОЦИАЛЬНО-ГУМАНИТАРНЫЕ НАУКИ
SOCIAL SCIENCES AND HUMANITIES

УДК 339.924 (1-67:476)
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-2-242-245>

Поступило в редакцию 28.11.2018
Received 28.11.2018

Т. С. Вергинская

Институт экономики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

**ИНТЕГРАЦИОННАЯ ПОЛИТИКА НА СУБНАЦИОНАЛЬНОМ УРОВНЕ В ЕАЭС:
ОСНОВНЫЕ АСПЕКТЫ ФОРМИРОВАНИЯ**

(Представлено членом-корреспондентом М. В. Мясниковичем)

Аннотация. Показана необходимость формирования к дополнению к существующему механизму экономической интеграции в ЕАЭС интеграционной политики на субнациональном уровне. Раскрыто содержание концептуальной основы ее разработки, особенностей объекта и субнационального управленческого звена как субъекта управления рассматриваемой политики. С учетом имеющихся региональных ограничений обоснованы перспективные направления интеграционной политики, включающие согласованную на уровне стран – членов ЕАЭС региональную политику, институциональный механизм, меры по углублению межрегиональных и приграничных связей на основе реализации региональных резервов и более тесной увязки с региональным развитием.

Ключевые слова: институты, интеграционная политика, местная власть, региональные ограничения, региональная политика, субнациональный уровень управления

Для цитирования. Вергинская, Т. С. Интеграционная политика на субнациональном уровне в ЕАЭС: основные аспекты формирования / Т. С. Вергинская // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2019. – Т. 63, № 2. – С. 242–245. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-2-242-245>

Tatsiana S. Vertinskaya

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

**INTEGRATION POLICY AT THE SUBNATIONAL LEVEL IN THE EAEU:
THE MAIN ASPECTS OF FORMATION**

(Communicated by Corresponding Member Mikhail V. Myasnikovich)

Abstract. The necessity to form the integration policy at the subnational level to the existing mechanism of economic integration in the EAEU is shown. The content of the conceptual framework of its elaboration, the features of the object and the subnational level of management as a subject of the policy is disclosed. Taking into account the existing regional restrictions, the directions of the integration policy are justified, including the regional policy aligned at the level of the EAEU member countries, the institutional framework, the measures to deepen interregional and border relations based on the implementation of regional reserves and a closer linkage with the regional development.

Keywords: institutions, integration policy, local government, regional restrictions, regional policy, subnational level of management

For citation: Vertinskaya T. S. Integration policy at the subnational level in the EAEU: the main aspects of formation. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2019, vol. 63, no. 2, pp. 242–245 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-2-242-245>

В настоящее время актуальной задачей дальнейшего укрепления Евразийского экономического союза (ЕАЭС) является поиск дополнительных резервов и незадействованных механизмов интеграции, которые Евразийская экономическая комиссия (ЕЭК) рассматривает как дополнение к Договору о создании Союза. Неиспользуемым в полной мере фактором роста евразийской интеграции можно определить межрегиональное и приграничное сотрудничество, что предпо-

лагает формирование к дополнению к существующему механизму экономической интеграции в ЕАЭС интеграционной политики на субнациональном уровне. Ее разработка базируется на следующих ключевых положениях.

Во-первых, интеграционная политика на субнациональном уровне призвана решить наиболее существенные проблемы развития межрегиональных и приграничных связей в ЕАЭС. В их числе: формирование межрегиональных связей главным образом в двухстороннем формате; отсутствие соответствующих институтов на наднациональном уровне; участие в интеграции преимущественно крупного бизнеса и государственных предприятий и незначительная роль малого и среднего предпринимательства; слабая связанность евразийского экономического пространства: доминирование взаимной торговли товарами, неразвитость инвестиционных, инновационных, социальных межрегиональных взаимодействий. И еще один важный вывод: население стран-партнеров, гражданское общество не ощутило всех преимуществ региональной интеграции в Союзе.

Во-вторых, концептуальной основой такой политики должна стать новая методология исследования интеграционных связей регионов, разработанная в рамках геопро пространственной парадигмы [1]. Ее основное содержание для целей формирования исследуемого механизма включает:

1) определение управления экономической интеграцией регионов как региональных фрагментов экономического пространства общих рынков товаров, услуг, капитала и трудовых ресурсов;

2) расширение арсенала управленческих методов и включение инструментов управления региональным развитием;

3) имплементация принципов устойчивого развития в управление интеграцией регионов с учетом того, что региональные и местные органы власти в силу своего положения в системе управления обладают потенциалом для реализации этой установки.

Это позволит увязать межрегиональные связи в общий формат экономической интеграции в ЕАЭС и выявить отношения, которые «выпали» из управленческого процесса, но реально существуют и важны для экономической интеграции регионов (с региональной средой, территориальными ресурсами, объектами экономического окружения).

В-третьих, содержательная часть предложенной к разработке политики интеграции регионов стран – членов ЕАЭС включает формулировку ключевых целей интеграции, определение политико-правового и экономического статуса основных субъектов управления, выделение специфического объекта управления, а также направлений и инструментов реализации интеграционной политики на субнациональном уровне.

Ключевыми целями интеграционной политики на субнациональном уровне необходимо рассматривать сплочение регионов в целях расширения и углубления экономической интеграции в ЕАЭС, а также обеспечение устойчивого развития регионов, рост региональной конкурентоспособности и повышение уровня благосостояния и качества жизни местных сообществ.

С учетом новой методологии исследования выделены объект интеграционной политики и субъекты ее реализации. Так, в соответствии с авторским подходом объект управления приобретает расширенную пространственную трактовку и представляет собой сложный комплекс отношений, декомпозиция которого может быть представлена следующим образом.

Во-первых, региональные рынки товаров, услуг, капитала и трудовых ресурсов, интегрированные в экономическое пространство общего рынка ЕАЭС и адаптированные к местным условиям. Во-вторых, интеграционная среда регионов, определяемая уровнем зрелости бизнес-среды, а также инвестиционной, инновационной, миграционной привлекательностью территорий, формируемой различными институтами, объектами инфраструктуры, что направлено на «снятие» различных региональных ограничений, искажающих единство экономического пространства ЕАЭС. В-третьих, отношения субъектов межрегиональных связей, возникающих внутри региона, главным образом по поводу использования территориальных условий и ресурсов.

С субъектной стороны речь идет об организационно-правовом выделении *субнационального звена* управления экономической интеграцией регионов стран – членов ЕАЭС и его следующих характеристиках.

Первое, субнациональный уровень управления в ЕАЭС формируется региональными и местными органами власти стран – членов ЕАЭС, которые различаются построением организационной

структуры и объемом компетенции, что определяет многообразие возможных вариантов и схем взаимодействия регионов. Особенность субнационального управленческого звена – это действия в общих объединительных целях всей интеграционной группировки, что осуществляется в настоящее время только в ЕС.

Во-вторых, субнациональное управленческое звено в ЕАЭС применительно к развитию межрегиональных и приграничных связей реализует свои функции в рамках трехуровневого управления, другими словами, на основе совместных действий национальных и наднациональных органов управления.

В-третьих, с учетом того факта, что в настоящее время в ЕАЭС не выделяется исключительная компетенция наднациональных, национальных и иных органов управления, по аналогии применительно к интеграционным связям регионов сфера ответственности трех управленческих уровней определяется на основе диспозитивных норм права.

В перспективе регламентацию деятельности субъектов управления интеграционными связями регионов на наднациональном, национальном, субнациональном уровнях целесообразно строить следующим образом.

Задачами *наднационального уровня в ЕАЭС* можно рассматривать формирование разнообразных каналов взаимодействия регионов с наднациональными структурами с целью более полного учета региональных интересов при принятии ключевых решений по евразийской интеграции; обеспечение соответствия правовых условий развития межрегионального сотрудничества законодательству ЕАЭС; разработку финансовых и организационных форм поддержки интеграции на субнациональном уровне в ЕАЭС.

Основная цель *национальных органов управления* – реализация стратегических целей государственной внешнеэкономической политики и страновых стратегий развития экспорта с учетом региональных особенностей традиционными внешнеэкономическими управленческими методами.

Регулирующая область *субнационального управленческого звена* образуется в результате усиления взаимосвязей социально-экономического развития регионов и их внешнеэкономической деятельности, а также как реализация на региональном уровне отдельных направлений национальной внешнеэкономической политики в рамках общей компетенции органов местной власти.

При выделении направлений интеграционной политики на субнациональном уровне в ЕАЭС конструктивным представляется подход, который опирается на учет существующих ограничений и препятствий для межрегионального и приграничного сотрудничества и ориентирован на выделенные компоненты объекта управления [2].

По результатам проведенного институционального анализа в ЕАЭС выявлены различия в уровне развития бизнес-среды регионов. Это создает определенные препятствия для развития интеграции на рыночной основе и активизации малого и среднего бизнеса как участника межрегиональных связей. Имеет место также территориальная дифференциация инвестиционной, миграционной, инновационной привлекательности регионов, а также разница в объеме компетенции и применяемых методах управления со стороны местных органов власти. Препятствует участию регионов в формировании ЕАЭС их дифференциация по уровню социально-экономического развития.

Таким образом, можно выделить два ключевых типа региональных ограничений: институциональные ограничения в регионах стран – членов ЕАЭС и ограничения, обусловленные различиями социально-экономического развития регионов и связанные с местными особенностями. Преодоление указанных ограничений формирует основные направления интеграционной политики на субнациональном уровне.

По *первому направлению* необходима разработка институционального механизма обеспечения интеграции на субнациональном уровне в ЕАЭС. Его основная задача – сформировать и развить рыночную и интеграционную среду в регионах. Это институт правового обеспечения межрегиональных и приграничных связей стран – членов ЕАЭС; формирование наднационального института регулирования экономической интеграции регионов в ЕАЭС; укрепление института местного самоуправления и общественных институтов; формирование институтов, обеспечивающих развитие разнообразных форм взаимодействия и координации деятельности региональных субъектов по различным направлениям экономической интеграции и др.

Второе направление интеграционной политики направлено на смягчение региональных различий по уровню социально-экономического развития стран – членов ЕАЭС и выражается в разработке и реализации *национальной региональной политики* стран-партнеров, нацеленной на их сплочение и конвергенцию на базе согласованных на уровне ЕАЭС принципов. В дальнейшем может стать актуальным формирование наднациональной региональной политики, выполняющей функции выравнивания уровней социально-экономического развития регионов.

Использование такого регионального инструмента, как *территориальная организация экономического пространства ЕАЭС* предполагает выделение точек регионального интеграционного роста. Речь идет о выделении особых территорий, обладающих высоким интеграционным потенциалом, которые рассматриваются в качестве региональных приоритетов интеграции в ЕАЭС. Первый тип – это мегаполисы и крупные агломерации; инновационные зоны, промышленные парки, научные и образовательные центры стран – членов ЕАЭС, имеющие международное значение; территории, находящиеся в зоне влияния трансъевропейских и трансатлантических транспортных коридоров, проходящих по территории стран – членов ЕАЭС. Второй тип – приграничные территории, межрегиональные туристические зоны, малые и средние города, имеющие международные сетевые и кластерные связи.

Третье направление – это сегодняшняя политика национальных и региональных органов власти по развитию межрегиональных и приграничных связей, которая должна получить дополнительный импульс на основе совершенствования методов управления (использование цифровых технологий, включение в интеграцию малого и среднего бизнеса, общественного сектора; разработки региональных стратегий, увязанных с межрегиональным сотрудничеством и др.).

В целом формирование интеграционной политики на субнациональном уровне в дополнение к созданному механизму экономической интеграции ЕАЭС обеспечит более устойчивое и сбалансированное развитие государств – участников Союза. Постепенно будет создана многосторонняя основа для участия регионов в функционировании общих рынков товаров, услуг, капитала, трудовых ресурсов, обеспечена реализация новых интеграционных эффектов, в том числе за счет большей сопряженности, координации и согласованности интеграционной и региональной политики стран – членов ЕАЭС.

Список используемых источников

1. Вертинская, Т. С. Теоретические и практические основы экономической интеграции регионов стран – членов ЕАЭС / Т. С. Вертинская. – Минск, 2018. – 372 с.
2. Основные направления экономического развития ЕАЭС до 2030 года. – М., 2015 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.eurasiancommission.org/ru/act/integr_i_makroec/dep_makroec_pol/seminar/Documents.pdf. – Дата доступа: 23.08.2018.

References

1. Vertinskaya T. S. *Theoretical and practical fundamentals of the economic integration of the regions of countries – EAEU members*. Minsk, 2018. 372 p. (in Russian).
2. *Basic directions of the economic development of the EAEU up to the year 2030*. Moscow, 2015. Available at: http://www.eurasiancommission.org/ru/act/integr_i_makroec/dep_makroec_pol/seminar/Documents.pdf (accessed 23 August 2018) (in Russian).

Информация об авторе

Вертинская Татьяна Сергеевна – канд. экон. наук, заведующая отделом. Институт экономики НАН Беларуси (ул. Сурганова, 1/2, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: vert.region@economics.basnet.by.

Information about the author

Vertinskaya Tatsiana Sergeevna – Ph. D. (Economy), Head of the Department. Institute of Economics of the National Academy of Sciences of Belarus (1/2, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vert.region@economics.basnet.by.

АГРАРНЫЕ НАУКИ
AGRARIAN SCIENCESУДК 636.082.636.4
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-2-246-256>Поступило в редакцию 21.01.2019
Received 21.01.2019**Академик И. П. Шейко¹, член-корреспондент Р. И. Шейко², Е. А. Янович¹, Н. В. Приступа¹,
Т. Н. Тимошенко¹, В. Н. Заяц¹, В. Н. Аниховская¹, К. А. Капшевич¹**¹*Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по животноводству,
Жодино, Республика Беларусь*²*Институт генетики и цитологии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь***НОВЫЙ ВЫСОКОПРОДУКТИВНЫЙ ЗАВОДСКОЙ ТИП СВИНЕЙ
«ПРИДНЕПРОВСКИЙ» В БЕЛОРУССКОЙ МЯСНОЙ ПОРОДЕ**

Аннотация. В результате проведенных исследований установлено, что показатели продуктивности созданного заводского типа соответствуют показателям целевого стандарта. Продуктивность маток-первоопоросок, а также маток с двумя и более опоросами по многоплодию составила 11,8 и 11,9 поросят, по молочности – 54,5–55,2 кг, по количеству поросят и массе гнезда при отъеме – 10 голов, 84,3–85,1 кг соответственно. Среди отобранных для воспроизводства хрячков по большинству признаков лучшими оказались животные линий Заслона, у которых показатели возраста достижения живой массы 100 кг и среднесуточного прироста от рождения до достижения живой массы 100 кг составили 170,5 дней и 717 г соответственно. При прижизненной оценке мясных качеств у молодняка созданного типа, отобранного для саморемонта, показатели толщины шпика, измеренные в двух точках спины, а также высота длиннейшей мышцы и содержание постного мяса в теле составили соответственно у свинок – 16,0, 18,7 и 44,2 мм и 52,0 %, у хрячков – 15,7, 17,2 и 45,3 мм и 53,2 %. Расчет значения комплексного индекса свиноматок показал, что у большинства животных его величина составила 100 %. Проведена оценка генетической структуры животных нового заводского типа в белорусской мясной породе по генам RYR 1, ESR, H-FABP и IGF2.

Ключевые слова: заводской тип свиней, свиноматки, хрячки, репродуктивные качества, собственная продуктивность, мясные качества, селекционные индексы, ДНК-маркеры

Для цитирования. Новый высокопродуктивный заводской тип свиней «Приднепровский» в белорусской мясной породе / И. П. Шейко [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2019. – Т. 63, № 2. – С. 246–256. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-2-246-256>

**Academician Ivan P. Sheyko¹, Corresponding Member Ruslan I. Sheyko², Elena A. Yanovich¹, Natalya V. Pristupa¹,
Tatyana N. Timoshenko¹, Vladimir N. Zayats¹, Irina V. Anihovskaya¹, Kristina A. Kapshevich¹**¹*Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Animal Husbandry,
Zhodino, Republic of Belarus*²*Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus***NEW HIGHLY PRODUCTIVE PLANT TYPE OF PIGS “PRIDNEPROVSKY” IN THE BELARUSIAN MEAT BREED**

Abstract. As a result of the research conducted, it was determined that the performance indicators of created plant type correspond to the indicators of the target standard. Performance of first litter gilts, as well as sows with two or more farrowings, amounted to 11.8 and 11.9 piglets of multiple pregnancy rate, 54.5–55.2 kg of milk yield, for the number of piglets and litter weight at weaning – 10 animals, 84.3–85.1 kg, respectively. Among the selected boars for reproduction according to a greater part of traits, animals of Zaslona line were the best, with indicators of the age of reaching a live weight of 100 kg and an average daily weight gain from birth to 100 kg of live weight made 170.5 days and 717 g, respectively. During the lifetime assessment of meat traits in young animals of the created type selected for self-repair, the back fat thickness values measured at two points of the back, as well as the height of the longest muscle and the lean meat content in body made 16.0, 18.7 and 44.2 mm and 52.0 %, for gilts, respectively, and 15.7, 17.2 and 45.3 mm and 53.2 % for boars, respectively. Calculation of the complex index of sows showed that in most animals its value made 100 points. Assessment of the genetic structure of animals of the new plant type in the Belarusian meat breed by genes RYR 1, ESR, H-FABP and IGF2 was carried out.

Keywords: plant type of pigs, sows, boars, performance traits, self-performance, meat traits, breeding indices, DNA markers

For citation: Sheyko I. P., Sheyko R. I., Yanovich E. A., Pristupa N. V., Timoshenko T. N., Zayats V. N., Anihovskaya I. V., Kapshevich K. A. New highly productive plant type of pigs “Pridneprovsky” in the Belarusian meat breed. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2019, vol. 63, no. 2, pp. 246–256 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-2-246-256>

Введение. Свиноводство – наиболее перспективная отрасль животноводства в мире, обеспечивающая потребительский рынок мясной продукцией. Селекционный процесс по совершенствованию существующих и созданию новых пород, типов и линий свиней непрерывный, трудоемкий и затратный. Чтобы животные соответствовали требованиям современного рынка, необходимо создание новых, более высокопродуктивных структурных единиц в породах [1–3].

При этом, учитывая, что апробированные в последние годы высокопродуктивные генотипы свиней выведены на принципах новой современной теории породообразования, совершенствование и создание новых селекционных стад и заводских линий проводится на радикальной реконструкции имеющегося генофонда с широким привлечением лучшего в мире селекционного материала. При этом осуществляется моделирование проектного генотипа с желательными качествами и уровнем продуктивности животных, а также систематическом проведении сравнительного испытания на сочетаемость животных создаваемых пород, типов и линий при разведении «в себе», а также при различных методах скрещивания и гибридизации [4–6].

Использование традиционных методов селекции не обеспечивает необходимых темпов роста производства животноводческой продукции. Вовлечение в число селекционируемых признаков ряда генетических тестов и параметров животных значительно ускоряет селекционный процесс и повышает эффективность дальнейшей работы. В связи с этим необходима разработка и использование при создании новых заводских линий и типов более совершенных методов селекции, которые позволили бы эффективно осуществлять работу по качественному улучшению существующих и созданию новых генотипов свиней [7–9].

Решение этих задач возможно при использовании методов геномной селекции, позволяющих идентифицировать гены, напрямую или косвенно связанные с хозяйственно полезными признаками, т. е. проводить уточняющую селекцию по генотипу, непосредственно на уровне ДНК. Селекция по генотипу не учитывает влияния модификационной изменчивости на проявление признаков продуктивности, делает возможным оценку животных в раннем возрасте независимо от пола, что в конечном итоге повышает эффективность селекционной работы, способствует идентификации и быстрому введению предпочтительных аллелей из ресурсных популяций в популяции реципиентов с целью повышения продуктивности и устойчивости к заболеваниям улучшаемых пород животных. Поэтому, чтобы избежать иностранной экспансии не только в экономике, но и в науке, необходимо интенсивное внедрение биотехнологий, в т. ч. и ДНК-технологий в производственную практику [10].

Применение генетических маркеров является перспективным направлением, обусловлено процессом совершенствования генетического потенциала отечественных пород, однако требует дифференцированного подхода в зависимости от породной принадлежности, генетической структуры популяции и конкретной селекционной задачи.

Доказано, что внедрение в селекционную практику маркерных генов позволяет увеличить многоплодие маток в среднем на 11 % и более, снизить удельный вес мертворожденных поросят до 2,5 %, а аварийных опоросов – до 3,4 %, повысить сохранность поросят к отъему на 10 %, откормочную и мясную продуктивность на 5–10 %, создать резистентные к стрессу стада свиней [11; 12].

Белорусская мясная порода свиней в республике используется в системах скрещивания и гибридизации, обеспечивая получение высокопродуктивных двух- и трехпородных помесей и гибридов. Животные этой породы стрессоустойчивы, хорошо приспособлены к разведению в условиях промышленной технологии, характеризуются отличной сочетаемостью с животными пород: крупная белая, белорусская черно-пестрая, ландрас и дюрок; устойчивы к болезням.

Однако для дальнейшего ее совершенствования необходимо, чтобы селекционный процесс по ее улучшению осуществлялся непрерывно [13; 14].

Материалы и методы исследований. Научно-исследовательская работа по созданию нового заводского типа в белорусской мясной породе проводилась в СГЦ «Заднепровский» «Оршанского КХП» Витебской, СГЦ «Заречье» Гомельской, ЗАО «Клевица» и ГП «ЖодиноАгроПлемЭлита» Минской областей.

Основные методы работы с породой: разведение по линиям с применением внутрелинейного подбора и кроссов линий; использование заказных спариваний и индивидуального подбора пар; отбор и оценка хрячков и свинок по собственной продуктивности; оценка качества туш, мяса и подкожного жира у животных на контрольном откорме.

С целью изучения полиморфизма генов RYR 1, ESR, H-FABP и IGF2 брали биопробы ткани ушной раковины животных и устанавливали их взаимосвязь с показателями продуктивности животных.

В лаборатории биохимических анализов проведены исследования по изучению гематологических и биохимических показателей крови с использованием приборов Medonic CA 620 и Cor-may Lumen.

Результаты и их обсуждение. Основу структуры белорусской мясной породы и создаваемого в ней заводского типа «Приднепровский» составляют племенные стада СГЦ «Заднепровский» Витебской, «Заречье» Гомельской, ЗАО «Клевица» и ГП «ЖодиноАгроПлемЭлита» Минской областей. К апробации нового заводского типа представлено 326 голов свиноматок и 30 хрячков.

Целенаправленная селекционно-племенная работа с животными заводского типа позволила получить высокопродуктивных животных. Они характеризуются крупностью и хорошо развитой задней частью туловища. Костяк крепкий, кожа белая, плотная и гладкая. Голова относительно небольшая, легкая, с прямым профилем. Шея средней длины. Холка ровная. Спина прямая, длинная и широкая. Ноги правильно поставленные, крепкие, с прочными копытами. У хрячков семенники крупные, плотные, равномерно развитые. По живой массе и длине туловища хрячки-производители белорусской мясной породы всех возрастных групп имеют достаточно высокие показатели.

При оценке в 12 месяцев живая масса и длина туловища в среднем по всем хозяйствам составили 214,3 кг и 161,4 см соответственно. Следует отметить относительную выравненность животных по величине живой массы. Наибольшей длиной туловища отличались хрячки в ЗАО «Клевица» – 169 см, на что, по-видимому, оказало влияние «прилитие крови» породы ландрас в этом хозяйстве.

При оценке в 24 месяца у имеющихся в хозяйствах животных величины аналогичных показателей составили – 298,2 кг и 177,2 см, в возрасте 36 месяцев – 370–380 кг и 183 см соответственно. У полновозрастных свиноматок живая масса в среднем составила 246,1 кг, длина туловища – 165,8 см.

Значения коэффициентов вариации по показателю длины туловища свидетельствуют о достаточно высокой однородности животных заводского типа. Изменчивость (C_v) у хрячков-производителей составляет 0,3–3,8 %, у свиноматок старше 36 месяцев – 0,7–3,6 %. По живой массе животные имеют более высокие значения коэффициентов вариации: у хрячков – 1,5–8,4 %, у свиноматок – 2,8–11,7 % соответственно.

Показатели продуктивности созданного типа соответствуют показателям, заложенным в программе создания типа (табл. 1).

Продуктивность маток-первоопоросок, а также с двумя и более опоросами по многоплодию составила 11,8 и 11,9 поросят на опорос, по молочности – 54,5–55,2 кг, по количеству поросят и массе гнезда при отъеме – 10 голов, 84,3–85,1 кг соответственно.

В среднем по всем хозяйствам многоплодие маток-первоопоросок, с двумя и более опоросами заводского типа соответствует требованиям класса элита и превосходит аналогичный показатель животных белорусской мясной породы по этому признаку на 0,95 гол., или 8,7 %.

Расчеты показали, что величины изменчивости репродуктивных признаков находятся в пределах норм для выборочной совокупности. Более высокие коэффициенты изменчивости по многоплодию установлены у свиноматок в ЗАО «Клевица», СГЦ «Заречье» и СГЦ «Заднепровский» – 8,9–11,7 %, по молочности в ЗАО «Клевица» и СГЦ «Заднепровский» – 6,2–9,9 %. Низкую степень

Т а б л и ц а 1. Показатели продуктивности свиноматок заводского типа в белорусской мясной породе в базовых хозяйствах

T a b l e 1. Productivity indicators of plant type sows in the Belarusian meat breed in basic farms

Показатель Index	«Заднепровский» “Zadneprovskii”	«Заречье» “Zarechie”	«Клевица» “Klevitsa”	«ЖодиноАгроПлемЭлита» “ZhodinoAgroPlemElita”	По всем хозяйствам In all farms
Матки с 1 опоросом, гол.	22	3	23	4	52
Многоплодие, гол.	11,6 ± 0,30	12,0 ± 0,58	12,3 ± 0,28	11,0	11,8 ± 0,18
Молочность, кг	56,5 ± 1,25	50,3 ± 0,88	53,2 ± 0,76	53,5 ± 0,31	54,5 ± 0,68
Отнято поросят, гол.	10,3 ± 0,18	10,0	9,9 ± 0,16	9,8 ± 0,25	9,9 ± 0,11
Масса гнезда при отъеме, кг	84,7 ± 1,74	74,5 ± 4,62	87,1 ± 0,71	80,5 ± 0,40	84,3 ± 1,0
Сохранность, %	88,8	83,3	80,5	89,0	83,4
Матки с 2 и более опоросами	220	13	34	7	274
Многоплодие, гол.	11,9 ± 0,10	12,3 ± 0,42	12,0 ± 0,14	11,3 ± 0,06	11,9 ± 0,08
Молочность, кг	55,3 ± 0,37	51,8 ± 0,30	56,4 ± 0,44	54,1 ± 0,55	55,2 ± 0,30
Отнято поросят, гол.	9,9 ± 0,03	10,1 ± 0,11	10,3 ± 0,09	9,8 ± 0,07	10,0 ± 0,03
Масса гнезда при отъеме, кг	85,4 ± 0,58	78,7 ± 1,03	86,1 ± 0,45	85,8 ± 1,35	85,1 ± 0,48
Сохранность, %	83,2	82,1	85,8	86,7	83,8
В среднем по селекционному стаду	242	16	57	11	326
Многоплодие, гол.	11,8 ± 0,89	12,1 ± 0,36	12,1 ± 0,14	11,2 ± 0,64	11,85 ± 0,07
Молочность, кг	55,4 ± 0,35	51,5 ± 0,32	55,1 ± 0,45	53,9 ± 0,36	55,1 ± 0,27
Отнято поросят, гол.	10,0 ± 0,03	10,1 ± 0,09	10,1 ± 0,09	9,9 ± 0,04	10,0 ± 0,03
Масса гнезда при отъеме, кг	85,3 ± 0,55	77,9 ± 1,18	86,5 ± 0,39	83,9 ± 1,16	85,8 ± 0,43
Сохранность, %	84,8	82,8	83,5	88,4	84,4

изменчивости показателей многоплодия и молочности имели животные в ГП «ЖодиноАгроПлемЭлита» – 1,0–1,2 % (первоопороски) и 1,5–2,7 % (матки с двумя и более опоросами). Значения коэффициентов изменчивости репродуктивных качеств свидетельствуют о достаточной степени выравниваемости показателей у животных заводского типа.

При оценке племенной ценности животных важнейшим звеном в ней является оценка по собственной продуктивности хрячков и свинок. Показатели оценки по собственной продуктивности хрячков нового заводского типа представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2. Показатели оценки по собственной продуктивности хрячков нового заводского типа в белорусской мясной породе

T a b l e 2. Indicators of estimation through the own productivity of plant type boars in the Belarusian meat breed

Линия Line	n	Возраст достижения живой массы, 100 кг, дни Age of attaining a live weight, 100 kg, days	Длина туловища, см Body length, cm	Толщина шпика, мм Back fat thickness, mm	Среднесуточный прирост, г Average daily gain, g
<i>Оцененные на элевере</i>					
Зефир	12	191,0 ± 3,79	122,6 ± 0,23	16,0 ± 0,64	645 ± 33
Зубр	10	182,0 ± 2,88	122,1 ± 0,35	15,7 ± 0,26	664 ± 34
Зенит	24	184,5 ± 2,22	122,3 ± 0,16	16,5 ± 0,25	658 ± 21
Зонт	12	191,1 ± 3,78	122,1 ± 0,36	16,4 ± 0,42	664 ± 30
Заслон	23	191,9 ± 3,23	122,3 ± 0,21	17,0 ± 0,18	632 ± 26
Среднее	81	188,2 ± 1,46	122,3 ± 0,11	16,4 ± 0,15	650 ± 12
<i>Отобранные для воспроизводства</i>					
Зефир	7	183,1 ± 3,21	124,7 ± 0,42	17,6 ± 0,30	715 ± 30
Зубр	4	175,3 ± 2,98	122,3 ± 0,48	16,0 ± 0,41	755 ± 12
Зенит	8	175,5 ± 1,18	122,4 ± 0,38	16,0 ± 0,19	721 ± 26
Зонт	4	179,0 ± 1,47	122,0 ± 0,41	16,0 ± 0,40	747 ± 21
Заслон	5	170,5 ± 3,20	122,4 ± 0,50	16,4 ± 0,24	717 ± 32
Среднее	26	176,5 ± 1,24	122,3 ± 0,18	16,1 ± 0,15	721 ± 12

Анализ таблицы свидетельствует, что лучшими показателями по толщине шпика на линейном уровне отличались хрячки линий Зубра и Зефира – 15,7 и 16,0 мм соответственно. По возрасту

достижения живой массы 100 кг и среднесуточному приросту от рождения до достижения живой массы 100 кг среди всех линий лучшими оказались хрячки линии Зубра и Зенита – 182,0 дней и 664 г, 184,5 дней и 658 г соответственно.

Среди отобранных для воспроизводства хрячков по большинству признаков лучшими оказались животные линий Заслона, у которых показатели возраста достижения живой массы 100 кг и среднесуточного прироста от рождения до достижения живой массы 100 кг составили 170,5 дней и 717 г соответственно. По длине туловища и толщине шпика различий у хрячков на линейном уровне не установлено.

При оценке по собственной продуктивности свинок на элевере установлено, что в среднем показатели возраста достижения живой массы 100 кг, среднесуточного прироста от рождения до достижения живой массы 100 кг, длины туловища и толщины шпика составили соответственно: 198,6 дней, 632 г, 123,1 см и 18,3 мм (табл. 3).

Т а б л и ц а 3. Показатели оценки по собственной продуктивности свинок нового заводского типа в белорусской мясной породе

Table 3. Indicators of estimation through the own productivity of new plant type sows in the Belarusian meat breed

Линия Line	<i>n</i>	Возраст достижения 100 кг, дней Age of attaining 100 kg, days	Длина туловища, см Body length, cm	Толщина шпика, мм Back fat thickness, mm	Среднесуточный прирост, г Average daily gain, g
<i>Оцененные на элевере</i>					
Зефир	49	199,0 ± 2,81	123,5 ± 0,26	18,3 ± 0,21	628 ± 13
Зубр	59	194,6 ± 1,52	123,1 ± 0,25	18,0 ± 0,15	662 ± 11
Зенит	56	201,5 ± 2,06	122,4 ± 0,26	18,6 ± 0,17	618 ± 12
Зонт	42	203,6 ± 2,73	123,5 ± 0,26	18,3 ± 0,21	594 ± 18
Заслон	56	196,0 ± 1,68	123,1 ± 0,23	18,2 ± 0,17	656 ± 13
Среднее	262	198,6 ± 0,97	123,1 ± 0,12	18,3 ± 0,08	632 ± 6
<i>Отобранные для воспроизводства</i>					
Зефир	7	183,1 ± 3,21	124,7 ± 0,42	17,6 ± 0,30	733 ± 34
Зубр	12	188,7 ± 3,12	123,3 ± 0,48	17,8 ± 0,21	702 ± 16
Зенит	15	195,5 ± 2,94	122,5 ± 0,41	18,0 ± 0,26	622 ± 23
Зонт	13	190,4 ± 3,56	124,2 ± 0,36	17,2 ± 0,23	649 ± 30
Заслон	5	190,8 ± 3,95	122,8 ± 0,37	17,4 ± 0,24	650 ± 44
Среднее	52	190,5 ± 1,58	123,4 ± 0,22	17,7 ± 0,12	650 ± 13

Свинки, принадлежащие к линиям Зубра и Заслона, оказались лучшими на линейном уровне по возрасту достижения живой массы 100 кг и, следовательно, по среднесуточному приросту от рождения до 100 кг. Параметры этих признаков находились в пределах от 194,6 до 196,0 дней, 656–662 г.

У отобранных для воспроизводства свинок лучшими по показателям энергии роста оказались животные, относящиеся к линиям Зефира и Зубра, у которых возраст достижения живой массы 100 кг находился в пределах 183,1–188,7 дней, среднесуточный прирост от рождения до 100 кг – 702–733 г.

Прижизненно измеренный показатель толщины шпика самым низким оказался у свинок линии Зонта – 17,2 мм, у животных остальных линий параметры этого признака находились в пределах 17,4–18,0 мм. По длине туловища различий у свинок на линейном уровне не установлено.

Расчет коэффициентов вариабельности при оценке по собственной продуктивности хрячков и свинок на элевере свидетельствует, что они варьировали по возрасту достижения живой массы 100 кг от 7,4 до 11,7 %, толщине шпика – от 4,0 до 7,2 % и среднесуточному приросту – от 1,4 до 9,8 %, длине туши – от 0,4 до 0,6 %, у свинок соответственно от 2,9 до 6,7 %; 6,0–10,1; 3,0–5,0; 1,2–1,5 %.

При прижизненной оценке мясных качеств у молодняка созданного заводского типа, отобранного для саморемонта, с помощью прибора Piglog 105 измеряли толщину шпика в двух точках, а также высоту длиннейшей мышцы спины и содержание постного мяса в теле, эти показатели

составили, соответственно, у свинок – 16,0, 18,7 и 44,2 мм и 52,0 %, у хрячков – 15,7, 17,2 и 45,3 мм и 53,2 % (табл. 4).

Т а б л и ц а 4. Показатели оценки мясных качеств молодняка нового заводского типа

Table 4. Indicators of estimation of the meat qualities of young animals of new plant type

Половозрастная группа Sex and age group	n	Piglog 105			
		толщина шпика, мм back fat thickness, mm	высота длиннейшей мышцы спины, мм height of the longest back muscle, mm	содержание постного мяса в теле, % content of lean meat in the body, %	
<i>Оцененные на элевере</i>					
Свинки	13	18,0 ± 0,9	18,9 ± 1,4	43,5 ± 1,7	
Хрячки	17	17,0 ± 1,1	17,9 ± 0,7	44,4 ± 1,3	
<i>Отобранные для воспроизводства</i>					
Свинки	9	16,0 ± 0,7	18,7 ± 1,3	44,2 ± 1,3	
Хрячки	4	15,7 ± 0,4	17,2 ± 0,3	45,3 ± 1,8	

Важным показателем в современной оценке племенной ценности свиней является расчет комплексного индекса животных.

Нами при определении племенной ценности свиноматок также проведен расчет и учтено значение комплексного индекса, включающего значения частных индексов по среднесуточному приросту от рождения до живой массы 100 кг, многоплодию и массе гнезда при отъеме:

$$K_{ис} = 0,30I_{сп} + 0,50I_{м} + 0,20I_{мг}$$

где $K_{ис}$ – комплексный индекс основных свиноматок; $I_{сп}$ – частный индекс по среднесуточному приросту от рождения до 100 кг; $I_{м}$ – частный индекс многоплодия; $I_{мг}$ – частный индекс массы гнезда при отъеме.

Величина частного индекса по среднесуточному приросту от рождения до достижения живой массы 100 кг у свиноматок линий Заслона и Зонта составила 99 %, у животных линий Зенита, Зефира и Зубра – 100 % (табл. 5). При расчете частного индекса многоплодия установлено, что у большинства животных заводского типа его значение составило 101 %, за исключением свиноматок линий Зефира и Зубра – 102 %. У животных линий Заслона, Зефира, Зонта и Зубра величина частного индекса по массе гнезда 101 %, у свиноматок линии Зенита – 100 %. Расчет значения комплексного индекса свиноматок показал, что у большинства животных его величина составила 100 %.

Т а б л и ц а 5. Показатели племенной ценности свиноматок заводского типа

Table 5. Indicators of the tribal value of plant type sows

Линия Line	n	Индекс среднесуточного прироста Index of the average daily gain	Индекс многоплодия Multiple fetus index	Индекс массы гнезда Nest mass index	Комплексный индекс свиноматок Complex index of sows
Заслон	27	99	101	101	100
Зенит	10	100	101	100	100
Зефир	32	100	102	101	101
Зонт	42	99	101	101	100
Зубр	13	100	102	101	101

Породообразовательный процесс в животноводстве, а также современная селекционная работа по повышению продуктивности сельскохозяйственных животных, в том числе в свиноводстве, немыслима без использования ДНК-технологии (маркерных генов). Проведенные нами исследования в этом направлении позволили разработать тест-системы для анализа аллельного полиморфизма генов, определить частоты встречаемости аллельных вариантов генов в различных заводских линиях свиней и установить взаимосвязи отдельных маркерных генов с продуктивными качествами свиней нового созданного типа.

Изучена генетическая структура животных нового типа по генам RYR 1, ESR, H-FABP и IGF2.

У хрячков в СГЦ «Заднепровский» выявлен полиморфизм гена RYR 1, представленный двумя аллелями: RYR 1^N(0,89) и RYR 1ⁿ(0,11). Идентифицированы генотипы: RYR 1^{NN} (78,2 %)

и RYR 1^{Nn} (21,8 %). У хряков-производителей в ГП «ЖодиноАгроПлемЭлита» и СГЦ «Заречье» полиморфизм гена RYRⁿ¹ не обнаружен. В данных хозяйствах животные с нежелательным стрессчувствительным генотипом-*nn* отсутствовали.

Вместе с тем этот факт не отрицает необходимости проведения молекулярно-генетического тестирования животных, чтобы полностью исключить проявление скрытых носителей и стрессчувствительных животных среди ремонтного молодняка.

Генетическое тестирование по гену ESR (маркер репродуктивных качеств свиноматок) позволило выявить полиморфизм данного гена, представленный двумя аллелями – ESR^A и ESR^B (табл. 6). Идентифицированы генотипы ESR^{AA}, ESR^{AB} и ESR^{BB}. Концентрация аллелей ESR^B и ESR^A у свиноматок в СГЦ «Заднепровский» составила 0,25 и 0,75, у хряков – 0,17 и 0,83. Большинство животных имели желательный генотип ESR^{AA} – 62,5–70,8 %. Частоты встречаемости генотипов ESR^{AB} и ESR^{BB} составили у свиноматок – 25 и 12,5 %, у хряков – 25 и 4,2 % соответственно.

Т а б л и ц а 6. Генетическая структура по гену ESR животных заводского типа

Table 6. Genetic structure through the gene ESR of plant type animals

Половозрастная группа Sex and age group	n	Частота встречаемости генотипов, % Frequency of occurrence of genotypes, %			Частота аллелей Allele frequency	
		ESR ^{AA}	ESR ^{AB}	ESR ^{BB}	ESR ^A	ESR ^B
<i>СГЦ «Заднепровский»</i>						
Свиноматки	18	62,5	25	12,5	0,75	0,25
Хряки-производители и ремонтные хрячки	24	70,8	25	4,2	0,83	0,17
<i>ГП «ЖодиноАгроПлемЭлита»</i>						
Хряки-производители	6	50	50	–	0,75	0,25
<i>СГЦ «Заречье»</i>						
Хряки-производители	1	100	–	–	1,0	–

Установлено, что концентрация аллеля ESR^B у хряков-производителей в ГП «ЖодиноАгроПлемЭлита» составила 0,25; ESR^A – 0,75. Частоты встречаемости генотипов ESR^{AA} и ESR^{AB} составили по 50 % соответственно. Хряков с генотипом ESR^{BB} в данном хозяйстве не выявлено. В СГЦ «Заречье» хряк линии Зубра имел генотип ESR^{AA}.

В качестве возможных маркеров признаков мясной продуктивности и качества мяса свиней рассматриваются гены семейства связывающих белков жирных кислот (FABP). Один из генов этого семейства – H-FABP представляет большой интерес в качестве гена-кандидата содержания внутримышечного жира – важнейшего показателя, определяющего качество мяса, а также в качестве возможного генетического маркера снижения содержания жира в туше свиней.

При диагностике гена H-FABP по типу H частота предпочтительного по содержанию внутримышечного жира генотипа H-FABP^{HH} составила у свиноматок в СГЦ «Заднепровский» 71,9, у хряков – 95,8 %. При этом наблюдается высокая частота встречаемости аллеля H – 0,83 и 0,87 % соответственно. Частота встречаемости гетерозиготного генотипа составила у хряков 4,2 %, у свиноматок – 21,9 %. Гомозиготный генотип выявлен у свиноматок – 6,2 %.

В ГП «ЖодиноАгроПлемЭлита» частота встречаемости генотипа H-FABP^{HH} составила 100 %, с концентрацией аллеля H-FABP^H – 1,0. В СГЦ «Заречье» идентифицирован генотип H-FABP^{hh}.

Кроме того, изучена генетическая структура хряков заводского типа в белорусской мясной породе на линейном уровне в СГЦ «Заднепровский» по гену IGF-2 (табл. 7). Генотипирование по гену IGF-2 показало наличие животных с генотипами QQ, Qq и qq. У животных линий Заслона, Зефира и Зонта удельный вес предпочтительных гомозигот IGF-2^{QQ} составил 20,0 %, у хряков-производителей линии Зенита – 33,0 %. Высокой частотой встречаемости нежелательного гомозиготного генотипа IGF-2^{qq} отличались животные линий Зефира и Зонта – 60,0 %.

Гематологические показатели крови молодняка заводского типа в белорусской мясной породе в 6-месячном возрасте представлены в табл. 8. Количество лейкоцитов, эритроцитов и гемоглобина составило (15,75–21,43)10⁹/л, (4,83–5,86)10¹²/л, 90,0–111,63 г/л соответственно.

Т а б л и ц а 7. Частота встречаемости генотипов гена IGF2 среди хряков в зависимости от линейной принадлежности

Table 7. Frequency of occurrence of genotypes of the gene IGF2 among boars depending on the linear affiliation

Линия Line	n	Частота встречаемости генотипов, % Frequency of occurrence of genotypes, %			Частота аллелей Allele frequency	
		IGF-2 ⁰⁰	IGF-2 ^{0a}	IGF-2 ^{aa}	IGF-2 ⁰	IGF-2 ^a
Заслон	5	20,0	40,0	40,0	0,40	0,60
Зефир	5	20,0	20,0	60,0	0,30	0,70
Зенит	6	33,0	17,0	50,0	0,42	0,58
Зонт	5	20,0	20,0	60,0	0,30	0,70

Т а б л и ц а 8. Гематологические показатели молодняка заводского типа в белорусской мясной породе

Table 8. Hematological indicators of plant type young animals in the Belarusian meat breed

Линия Line	Лейкоциты, 10 ⁹ /л White blood cells, 10 ⁹ /l	Эритроциты, 10 ¹² /л Red blood cells, 10 ¹² /l	Гемоглобин, г/л Hemoglobin, g/l	Кальций, ммоль/л Calcium, mmole/l
Зубр	19,73 ± 1,22	4,83 ± 0,69	90,0 ± 12,42	2,24 ± 0,01
Заслон	21,07 ± 0,35	5,64 ± 0,58	108,67 ± 11,14	2,11 ± 0,15
Зефир	17,43 ± 1,07	5,72 ± 0,15	109,50 ± 2,33	1,98 ± 0,04
Зонт	15,75 ± 4,36	5,86 ± 0,17	111,63 ± 4,84	1,88 ± 0,05
Зенит	21,43 ± 1,07	4,86 ± 0,42	102,50 ± 6,51	1,94 ± 0,07
Среднее	19,36 ± 0,86	5,43 ± 0,17	106,00 ± 3,06	2,01 ± 0,04

Более высокий уровень содержания лейкоцитов в крови имели животные линий Заслона и Зенита – (21,07–21,43)10⁹/л. По количеству эритроцитов в крови существенных различий у молодняка свиней не установлено. Подсвинки линии Зонта отличались лучшим показателем содержания гемоглобина в крови – 111,63 г/л. Содержание кальция в крови у молодняка в среднем составило 2,01 ммоль/л.

Об особенностях белкового обмена в организме молодняка заводского типа в белорусской мясной породе можно судить по белковому составу сыворотки крови.

Установлено, что у подсвинков всех линий показатели белкового состава крови находились в пределах нормы – 58,17–68,40 г/л. Наибольшее количество альбумина в сыворотке крови зафиксировано у животных линий Зенита, Зубра и Зонта – 28,14–30,23 г/л.

Для раннего прогнозирования продуктивности животных перспективными являются ферменты сыворотки крови, катализирующие различные обменные процессы в организме: аспаратаминотрансфераза (АСТ), аланинаминотрансфераза (АЛТ), креатинкиназа (КК) и лактатдегидрогеназа (ЛДГ).

Наиболее высокую активность АСТ и АЛТ имели животные линии Зонта – 46,80 ед/л и 41,63 ед/л (табл. 9).

Т а б л и ц а 9. Показатели активности АСТ, АЛТ, КК и ЛДГ в сыворотке крови свиней

Table 9. Indicators of the activity of aspartate aminotransferase, alamine aminotranferase, creatine kinase and lactate dehydrogenase in the blood serum of pigs

Линия Line	АЛТ, ед/л ALT, units/l	АСТ, ед/л AST, units/l	ЛДГ, ед/л LDG, units/l	Триглицериды, ммоль/л Triglycerides, mmole/l	Креатинин, ммоль/л Creatinine, mmole/l
Зубр	39,67 ± 3,99	41,43 ± 1,75	179,00 ± 21,57	0,85 ± 0,12	83,31 ± 5,37
Заслон	39,77 ± 1,17	40,17 ± 3,73	211,10 ± 42,68	0,77 ± 0,21	90,88 ± 6,02
Зефир	36,83 ± 1,71	44,00 ± 1,91	154,48 ± 28,51	0,50 ± 0,07	85,22 ± 3,75
Зонт	41,63 ± 0,89	46,80 ± 1,10	160,00 ± 4,12	0,50 ± 0,03	85,32 ± 4,42
Зенит	32,58 ± 3,14	41,50 ± 4,59	156,53 ± 15,94	0,67 ± 0,14	77,60 ± 5,78
Среднее	37,96 ± 1,09	42,80 ± 1,24	171,11 ± 9,60	0,62 ± 0,05	84,65 ± 2,08

Молодняк линий Зубра и Заслона имел примерно одинаковый уровень активности аминотрансфераз – 39,67–39,77 и 40,17–41,43 ед/л. Самая низкая активность АЛТ зафиксирована

у животных линии Зенита – 32,58 ед/л. Более высокая активность аминотрансфераз свидетельствует о наиболее интенсивном процессе роста животных, об усиленных обменных процессах, связанных с синтезом белка для наращивания мышечной ткани.

Выявлены различия по активности КК и ЛДГ сыворотки крови. Достоверно более высокий уровень и КК и ЛДГ имели животные линии Заслона – 90,88 ммоль/л и 211,10 ед/л, что выше величин аналогичных показателей молодняка других линий на 5,56–13,28 ммоль/л и 32,1–56,62 ед/л соответственно. Более низкий уровень активности креатинина и лактатдегидрогеназы наблюдался у подсвинков линии Зенита – 77,60 ммоль/л и 156,53 ед/л.

Уровень триглицеридов в крови составил 0,50–0,85 ммоль/л, находясь в пределах физиологической нормы. Наибольшие величины данного показателя имел молодняк линий Заслона и Зубра – 0,77–0,85 ммоль/л.

Установлено, что показатели гематологического состава и биохимических свойств крови молодняка заводского типа в белорусской мясной породе находились в пределах физиологической нормы, что свидетельствует о высоком уровне адаптационных возможностей и стрессустойчивости животных.

Заключение. Путем углубленной целенаправленной селекционной работы на основе применения современных методов – ДНК-технологий (маркер-зависимой селекции) и индексной селекции в селекционных стадах базовых хозяйств СГЦ «Заднепровский» «Оршанского КХП» Витебской, СГЦ «Заречье» Гомельской, ЗАО «Клевица» и ГП «ЖодиноАгроПлемЭлита» Минской областей создан заводской тип свиней «Приднепровский» в белорусской мясной породе, представленный 5 заводскими линиями: Заслона, Зенита, Зефира, Зонта, Зубра, отличающийся высокими воспроизводительными качествами: многоплодие в среднем составило 11,85 голов, молочность – 55,1 кг, количество голов при отъеме в 35 дней – 10,0 голов, масса гнезда при отъеме в 35 дней – 85,8 кг, сохранность – 84,4 %.

Среди отобранных для воспроизводства хрячков по большинству признаков лучшими оказались животные линий Заслона, у которых показатели возраста достижения живой массы 100 кг и среднесуточного прироста от рождения до достижения живой массы 100 кг составили 170,5 дней и 717 г соответственно. По длине туловища и толщине шпика различий у хрячков на линейном уровне не установлено.

При прижизненной оценке мясных качеств у молодняка созданного типа, отобранного для саморемонта, показатели толщины шпика, измеренные в двух точках спины, а также высота длиннейшей мышцы и содержание постного мяса в теле составили соответственно у свинок – 16,0, 18,7 и 44,2 мм и 52,0 %, у хрячков – 15,7, 17,2 и 45,3 мм и 53,2 %.

Расчет значения комплексного индекса свиноматок показал, что у большинства животных его величина составила 100 %.

Проведена оценка генетической структуры животных нового заводского типа в белорусской мясной породе по генам RYR 1, ESR, H-FABP и IGF2.

У хрячков в СГЦ «Заднепровский» идентифицированы генотипы RYR 1^{NN} (78,2 %) и RYR 1^{Nn} (21,8 %). Установлено, что концентрация аллеля ESR^B у животных различных половозрастных групп в хозяйствах составила 0,17–0,25; ESR^A – 0,75–0,83.

Генотипирование животных по гену H-FABP (аллельные системы H и D) показало наличие животных с генотипами HH (71,9–95,8 %), Hh (4,2–25 %). Гомозиготный генотип hh выявлен только у свиноматок – 6,2 %.

Концентрация предпочтительного генотипа H-FABP^{dd} и аллеля H-FABP^d у хрячков-производителей в ГП «ЖодиноАгроПлемЭлита» составили 62,5 % и 0,75, в СГЦ «Заднепровский» – 70,8 % и 0,74 соответственно.

Удельный вес предпочтительных гомозигот IGF-2^{QQ} у хрячков-производителей в зависимости от линейной принадлежности составил 20,0–33,0.

Установлено, что показатели гематологического состава и биохимических свойств крови молодняка заводского типа находились в пределах физиологической нормы, что свидетельствует о высоком уровне адаптационных возможностей и стрессустойчивости животных.

Список использованных источников

1. Бекенев, В. А. Селекция свиней / В. А. Бекенев. – Новосибирск, 1997. – 184 с.
2. Волкопялов, Б. Т. Племенное дело в свиноводстве / Б. Т. Волкопялов. – М., 1967. – 296 с.
3. Шейко, И. П. Скрещивание специализированных мясных пород свиней Беларуси / И. П. Шейко // Свиноводство. – 2002. – № 5. – С. 4–5.
4. Шейко, Р. И. Продуктивные качества и биологические особенности белорусской мясной породы свиней и пути ее совершенствования: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук / Р. И. Шейко. – Жодино, 1998. – 17 с.
5. Шмаков, Ю. И. Эффективность преимущественной селекции при чистопородном разведении / Ю. И. Шмаков // Материалы 7-й междунар. науч.-производств. конф. – Жодино, 2000. – С. 12–14.
6. Козловский, В. Т. О возможностях селекции свиней на увеличение содержания мяса в туше / В. Т. Козловский, А. И. Филатов, В. Н. Сухоруков // Сб. науч. тр. ВИЖ. – Дубровицы, 1969. – Вып. 14. – С. 16–20.
7. Заяц, В. Н. Использование помесных хряков в системе гибридизации Республики Беларусь / В. Н. Заяц // Актуальные проблемы интенсификации производства продуктов животноводства: материалы междунар. науч.-практ. конф. – Жодино, 1999. – С. 44–46.
8. Зиновьева, Н. А. Современное состояние и перспективы биотехнологии в животноводстве / Н. А. Зиновьева, Л. К. Эрнст. – Дубровицы, 2006. – 375 с.
9. Влияние хряков некоторых импортных пород на мясную продуктивность гибридного молодняка / Л. А. Федоренкова [и др.] // Зоотехническая наука Беларуси. – Жодино, 2005. – Т. 40. – С. 128–132.
10. Калашникова, Л. А. Возможности использования ДНК-маркеров продуктивных качеств животных в практической селекционной работе / Л. А. Калашникова // Современные достижения и проблемы биотехнологии сельскохозяйственных животных. – Дубровицы, 2003. – С. 33–39.
11. Эрнст, Л. К. Генная инженерия – важнейший фактор селекции сельскохозяйственных животных 21 века / Л. К. Эрнст // ДНК-технологии в клеточной инженерии и маркирование признаков сельскохозяйственных животных: материалы междунар. науч. конф. – Дубровицы, 2001. – С. 7–18.
12. Епишко, Т. И. Интенсификация селекционных процессов в свиноводстве с использованием классических методов генетики и ДНК-технологии / Т. И. Епишко. – Жодино, 2008. – 346 с.
13. Шейко, И. П. Оценка и отбор сельскохозяйственных животных желательного типа: учеб.-метод. пособие / И. П. Шейко, В. И. Караба. – Минск, 2004. – 77 с.
14. Подскребкин, Н. В. Система селекционно-генетических приемов и методов совершенствования существующих и выведение новых пород и типов свиней в условиях интенсификации свиноводства: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук / Н. В. Подскребкин. – Жодино, 2008. – 40 с.

References

1. Bekenev V. A. *Pig breeding*. Novosibirsk, 1997. 184 p. (in Russian).
2. Volkopyalov B. T. *Breeding business in pig*. Moscow, 1967. 296 p. (in Russian).
3. Sheyko I. P. Crossbreeding of specialized meat breeds of pigs of Belarus. *Svinovodstvo [Pig breeding]*, 2002, no. 5, pp. 4–5 (in Russian).
4. Sheyko R. I. *Productive qualities and biological features of the Belarusian meat breed of pigs and ways of its improvement*. Zhodino, 1998. 17 p. (in Russian).
5. Shmakov Yu. I. Efficiency of the advanced selection in pure breeding. *Materialy 7 mezhdunarodnoi nauchno-proizvodstvennoi konferentsii [Proceedings of the 7th International Scientific and Production Conference]*. Zhodino, 2000, pp. 12–14 (in Russian).
6. Kozlovskii V. T., Filatov A. I., Sukhorukov V. N. About the possibilities of breeding pigs to increase the content of meat in carcass. *Sbornik nauchnykh trudov VIZH [Collection of scientific papers of VIZh]*. Dubrovitsy, 1969, vol. 14, pp. 16–20 (in Russian).
7. Zayats V. N. Use of local boars in the system of hybridization in the Republic of Belarus. *Aktual'nye problemy intensifikatsii proizvodstva produktov zhivotnovodstva: materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii [Actual problems of intensifying the production of livestock products: materials of the international scientific-practical conference]*, Zhodino, 1999, pp. 44–46 (in Russian).
8. Zinov'eva N. A., Ernst L. K. *Modern state-of-art and perspectives of biology in animal husbandry*. Dubrovitsy, 2006. 375 p. (in Russian).
9. Fedorenkova L. A., Sheyko R. I., Podskriobkin N. V., Melnikov A. F. The influence of foreign boars on meat productivity of hybrids. *Zootekhnicheskaya nauka Belarusi [Zootechnical science of Belarus]*. Zhodino, 2005, vol. 40, pp. 128–132 (in Russian).
10. Kalashnikova L. A. Possibilities of use of DNA-markers of productive qualities of animals in practical selection work. *Sovremennye dostizheniya i problemy biotekhnologii sel'skokhozyaistvennykh zhivotnykh [Modern achievements and problems of biotechnology of farm animals]*. Dubrovitsy, 2003, pp. 33–39.
11. Ernst L. K. Gene engineering is the most important factor of selection of agricultural animals of the 21 century. *DNK-tekhnologii v kletochnoi inzhenerii i markirovanie priznakov sel'skokhozyaistvennykh zhivotnykh: materialy mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii [DNA technology in cell engineering and the labeling of signs of farm animals: materials of the international scientific conference]*. Dubrovitsy, 2001, pp. 7–18 (in Russian).

12. Epishko T. I. *Intensification of selection processes in pig breeding with the use of the classical genetics methods and the DNA technology*. Zhodino, 2008. 346 p. (in Russian).

13. Sheyko I. P., Karaba V. I. *Estimation and selection of agricultural animals of desired type*. Minsk, 2004. 77 p. (in Russian).

14. Podskrebkin N. V. *System of selection-genetic means and methods of improving the existing and breeding new breeds and types of pigs under the conditions of intensification of pig breeding*. Zhodino, 2008. 40 p. (in Russian).

Информация об авторах

Шейко Иван Павлович – академик, д-р с.-х. наук, профессор, первый заместитель генерального директора. НПЦ НАН Беларуси по животноводству (ул. Фрунзе, 11, 222160, Жодино, Республика Беларусь). E-mail: belniig@tut.by.

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

Янович Елена Анатольевна – канд. с.-х. наук, вед. науч. сотрудник. НПЦ НАН Беларуси по животноводству (ул. Фрунзе, 11, 222160, Жодино, Республика Беларусь). E-mail: yanovichhelen@mail.ru.

Приступа Наталья Владимировна – канд. с.-х. наук, вед. науч. сотрудник. НПЦ НАН Беларуси по животноводству (ул. Фрунзе, 11, 222160, Жодино, Республика Беларусь). E-mail: natali.pristupa.77@mail.ru.

Тимошенко Татьяна Николаевна – канд. с.-х. наук, доцент, гл. науч. сотрудник. НПЦ НАН Беларуси по животноводству (ул. Фрунзе, 11, 222160, Жодино, Республика Беларусь). E-mail: nice.marina.78@mail.ru.

Заяц Владимир Николаевич – канд. с.-х. наук, вед. науч. сотрудник лаборатории гибридизации в свиноводстве. НПЦ НАН Беларуси по животноводству (ул. Фрунзе, 11, 222160, Жодино, Республика Беларусь). E-mail: wowa4006@mail.ru.

Аниховская Ирина Валерьевна – науч. сотрудник. НПЦ НАН Беларуси по животноводству (ул. Фрунзе, 11, 222160, Жодино, Республика Беларусь). E-mail: anirina26@mail.ru.

Капшевич Кристина Александровна – аспирант. НПЦ НАН Беларуси по животноводству (ул. Фрунзе, 11, 222160, Жодино, Республика Беларусь). E-mail: box@polessu.by.

Information about the authors

Sheyko Ivan Pavlovich – Academician, D. Sc. (Agrarian), Professor, First Deputy General Director. Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Animal Husbandry (11, Frunze Str., 222160, Zhodino, Republic of Belarus). E-mail: belniig@tut.by.

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

Yanovich Elena Anatolyevna – Ph. D. (Agrarian), Leading researcher. Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Animal Husbandry (11, Frunze Str., 222160, Zhodino, Republic of Belarus). E-mail: yanovichhelen@mail.ru.

Pristupa Natalya Vladimirovna – Ph. D. (Agrarian), Leading researcher. Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Animal Husbandry (11, Frunze Str., 222160, Zhodino, Republic of Belarus). E-mail: natali.pristupa.77@mail.ru.

Timoshenko Tatyana Nikolaevna – Ph. D. (Agrarian), Associate professor, Chief researcher. Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Animal Husbandry (11, Frunze Str., 222160, Zhodino, Republic of Belarus). E-mail: nice.marina.78@mail.ru.

Zayats Vladimir Nikolaevich – Ph. D. (Agrarian), Leading researcher. Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Animal Husbandry (11, Frunze Str., 222160, Zhodino, Republic of Belarus). E-mail: wowa4006@mail.ru.

Anihovskaya Irina Valerievna – Researcher. Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Animal Husbandry (11, Frunze Str., 222160, Zhodino, Republic of Belarus). E-mail: anirina26@mail.ru.

Kapshevich Kristina Aleksandrovna – Postgraduate student. Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Animal Husbandry (11, Frunze Str., 222160, Zhodino, Republic of Belarus). E-mail: box@polessu.by.