

ДОКЛАДЫ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ

МИНСК. БЕЛОРУССКАЯ НАУКА. 2018. ТОМ 62. № 3

Выходит шесть номеров в год

Журнал основан в июле 1957 года

Учредитель – Национальная академия наук Беларуси

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

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

Главный редактор

Владимир Григорьевич Гусаков

Председатель Президиума Национальной академии наук Беларуси, 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

И. В. Залуцкий – Институт физиологии Национальной академии наук Беларуси, 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 – Институт социологии 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
А. И. Лесникович – Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь
В. Ф. Логинов – 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 биоорганической химии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь
И. П. Шейко – Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по животноводству, Жодино, Беларусь

Р е д а к ц и о н н ы й с о в е т

- Ж. И. Алферов** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский академический университет Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия
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. Карклинш – 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. 2018. Т. 62. № 3

Выходит на русском, белорусском и английском языках

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

Сдано в набор 20.06.2018. Выпуск в свет 28.06.2018. Формат 60×84¹/₈. Бумага офсетная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 14,88. Уч.-изд. л. 16,4. Тираж 156 экз. Заказ 122.

Цена: индивидуальная подписка – 10,47 руб.; ведомственная подписка – 25,45 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, 2018

DOKLADY OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS

MINSK. BELARUSKAYA NAVUKA. 2018. Vol. 62. No. 3

Published bimonthly

The journal has been published since July, 1957

Founder – National Academy of Sciences of Belarus

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

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

Editor-in-Chief

Vladimir 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 – Institute of Sociology 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

Anatoly I. Lesnikovich – Belarusian State University, 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
Iosiph V. Zalutsky – Institute of Physiology of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Editorial Council

Zhores Alferov – Saint Petersburg National Research Academic University of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia
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. 2018. Vol. 62. No.3

Printed in Russian, Belarusian and English languages

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

Sent for press 20.06.2018. Output 28.06.2018. Format 60×84¹/₈. Offset paper.
Digital press. Printed sheets 14,88. Publisher's signatures 16,4. Circulation 156 copies. Order 122.
Price: individual subscription – 10,47 BYN, departmental subscription – 25,45 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, 2018

СОДЕРЖАНИЕ

МАТЕМАТИКА

- Деменчук А. К. О сильно нерегулярных периодических решениях линейного однородного дискретного уравнения первого порядка..... 263

ФИЗИКА

- Троянчук И. О., Бушинский М. В., Терешко Н. В., Чобот А. Н., Мантыцкая О. С., Чобот Г. М., Добрянский В. М., Пастушонок С. Н. Причина метамагнитного перехода в $\text{EuMn}_{0,5}\text{Co}_{0,5}\text{O}_3$ 268
- Овсюк Е. М., Войнова Я. А., Редьков В. М. Решения Фробениуса и анализ туннельного эффекта для частицы со спином 1/2 в поле Шварцшильда..... 274

ХИМИЯ

- Андрианов А. М., Николаев Г. И., Кашин И. А., Корноушенко Ю. В., Усанов С. А. Компьютерный дизайн потенциальных ингибиторов ароматазы на основе производных 1,2,4-триазола..... 281
- Зураев А. В., Лишай А. В., Григорьев Ю. В., Ивашкевич О. А. Синтез и антибактериальная активность некоторых 1,4- и 1,4,5-замещенных-1*H*-1,2,3-триазолов по отношению к штамму *Staphylococcus aureus*..... 293
- Соломянский А. Е., Коленченко Д. А., Мельникова Г. Б., Синькевич Ю. В., Агабеков В. Е. Гидро- и олеофобные покрытия на основе поливинилового спирта и наночастиц диоксида кремния..... 298

БИОЛОГИЯ

- Бусева Ж. Ф., Газерани Фарахани Ш. Б., Верес Ю. К., Колмакова А. А., Сущик Н. Н. Стехиометрический состав сестона в литорали и пелагиали мелководного озера Обстерно (Беларусь)..... 304

МЕДИЦИНА

- Даниленко О. А., Макаревич Е. Р., Сердюченко Н. С. Хирургический подход к устранению хронической посттравматической нестабильности плечевого сустава..... 311
- Смаль М. П., Никитченко Н. В., Ролевич А. И., Набебина Т. И., Красный С. А., Гончарова Р. И. Влияние метилирования гена *p16* на риск прогрессирования рака мочевого пузыря без мышечной инвазии..... 322

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

- Матвеев А. В. Районирование территории Беларуси по возможным последствиям проявления природных и природно-антропогенных опасностей литосферного класса..... 329
- Обровец С. М., Яшин И. А. О нетрадиционных нефтегазоперспективных коллекторах межсолевого комплекса Припятского прогиба..... 335

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Ассад М. С., Грушевский В. В., Пенязьков О. Г., Тарасенко И. Н. Выбросы полициклических ароматических углеводородов в продуктах сгорания автомобильных бензиновых двигателей..... 341
- Пилипенко В. А., Солодуха В. А., Горушко В. А., Омельченко А. А. Твердофазная рекристаллизация механически нарушенного слоя кремния при быстрой термообработке..... 347
- Лях М. Ю., Акулич А. В., Гринчук П. С. Сопряженный теплообмен при получении стеклянных микросфер в газопламенном реакторе..... 353

СОЦИАЛЬНО-ГУМАНИТАРНЫЕ НАУКИ

- Котляров И. В. Историческая память как важнейший фактор цивилизационного кода (социологический дискурс)..... 364

АГРАРНЫЕ НАУКИ

- Шейко Я. И., Жмойдяк Д. А. Биохимический состав тела карпов-двухлетков различных межпородных кроссов..... 374

CONTENTS*MATHEMATICS*

- Demenchuk A. K.** Strongly irregular periodic solutions of the first-order linear homogeneous discrete equation..... 263

PHYSICS

- Troyanchuk I. O., Bushinsky M. V., Tereshko N. V., Chobot A. N., Mantytskaya O. S., Chobot G. M., Dobraynsky V. M., Pastushonok S. N.** Reason for a metamagnetic transition in $\text{EuMn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{O}_3$ 268
- Ovsyuk E. M., Voynova Ya. A., Red'kov V. M.** Frobenius' solutions and the analysis of the tunneling effect for spin 1/2 particle through the Schwarzschild barrier..... 274

CHEMISTRY

- Andrianov A. M., Nikolaev G. I., Kashyn I. A., Kornoushenko Yu. V., Usanov S. A.** Computer-aided design of potential aromatase inhibitors based on 1,2,4-triazole derivatives..... 281
- Zuraev A. V., Lishai A. V., Grigoriev Y. V., Ivashkevich O. A.** Synthesis and antibacterial activity of some 1,4- and 1,4,5-substituted-1*H*-1,2,3-triazoles in relation to the *Staphylococcus aureus* strain..... 293
- Salamianski A. E., Kalenchanka D. A., Melnikova G. B., Sinkevich Yu. V., Agabekov V. E.** Hydro- and oleophobic coatings based on polyvinyl alcohol and silicon dioxide nanoparticles..... 298

BIOLOGY

- Buseva Zh. F., Gazerani Farahani Sh. B., Veras Yu. K., Kolmakova A. A., Sushchik N. N.** Stoichiometric composition of seston in littoral and pelagial zones of shallow Lake Obsterno (Belarus)..... 304

MEDICINE

- Danilenko O. A., Makarevich E. R., Serduchenko N. S.** Surgical approach to eliminating the post-traumatic instability of the shoulder joint 311
- Smal M. P., Nikitchenko N. V., Rolevich A. I., Nabebina T. I., Krasny S. A., Goncharova R. I.** Influence of *p16* gene methylation on the risk of progression of non-muscle invasive bladder cancer..... 322

EARTH SCIENCES

- Matveyev A. V.** Zoning of the territory of Belarus through possible consequences of manifestation of nature and nature-anthropogenous hazards of lithosphere class..... 329
- Abravets S. M., Yashin I. A.** Non-traditional oil and gas-perspective reservoirs of the inter-salt complex of the Pripyat trough..... 335

TECHNICAL SCIENCES

- Assad M. S., Grushevski V. V., Penyazkov O. G., Tarasenko I. N.** Emission of polycyclic aromatic hydrocarbons contained in combustion products of gasoline engines..... 341
- Pilipenko V. A., Solodukha V. A., Gorushko V. A., Omelchenko A. A.** Solid phase recrystallization of a mechanically disrupted silicon layer subjected to rapid thermal treatment..... 347
- Liakh M. Yu., Akulich A. V., Grinchuk P. S.** Conjugate heat transfer in the production of glass microspheres in a gas-flame reactor..... 353

SOCIAL SCIENCES AND HUMANITIES

- Kotlyarov I. V.** Historical memory as the most important factor of the civilizational code (sociological discourse) 364

AGRARIAN SCIENCES

- Sheiko Ya. I., Zhmoidyak D. A.** Biochemical composition of the body of two-year carps of different mixed bred crosses..... 374

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

МАТЕМАТИКА
MATHEMATICS

УДК 517.925
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-3-263-267>

Поступило в редакцию 25.04.2018
Received 25.04.2018

А. К. Деменчук

Институт математики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

**О СИЛЬНО НЕРЕГУЛЯРНЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ РЕШЕНИЯХ ЛИНЕЙНОГО
ОДНОРОДНОГО ДИСКРЕТНОГО УРАВНЕНИЯ ПЕРВОГО ПОРЯДКА**

(Представлено академиком Н. А. Изобовым)

Аннотация. В 1950 г. Х. Массера доказал, что скалярное периодическое обыкновенное дифференциальное уравнение первого порядка не имеет сильно нерегулярных периодических решений, т. е. таких, что период решения несоизмерим с периодом уравнения. Для разностных уравнений с дискретным временем сильная нерегулярность означает, что период уравнения является взаимно простым по отношению к периоду его решения. Известно, что в случае дискретных уравнений упомянутый результат Х. Массеры полного аналога не имеет.

Цель работы – исследовать возможность реализации аналога теоремы Х. Массеры для некоторых классов разностных уравнений. Для этого рассматривается класс линейных разностных уравнений. Доказано, что линейное однородное нестационарное периодическое дискретное уравнение первого порядка не имеет сильно нерегулярных периодических решений, отличных от постоянных.

Ключевые слова: периодические разностные уравнения, периодические последовательности, сильно нерегулярные периодические решения

Для цитирования. Деменчук, А. К. О сильно нерегулярных периодических решениях линейного однородного дискретного уравнения первого порядка / А. К. Деменчук // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 3. – С. 263–267. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-3-263-267>

Aleksandr K. Demenchuk

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

**STRONGLY IRREGULAR PERIODIC SOLUTIONS OF THE FIRST-ORDER LINEAR
HOMOGENEOUS DISCRETE EQUATION**

(Communicated by Academician Nikolai A. Izobov)

Abstract. In 1950 J. Massera proved that a first-order scalar periodic ordinary differential equation has no strongly irregular periodic solutions, that is, such solutions whose period of solution is incommensurable with the period of equation. For difference equations with discrete time, strong irregularity means that the period of the equation and the period of its solution are relatively prime numbers. It is known that in the case of discrete equations, the above result of J. Massera has no complete analog.

The purpose of this article is to investigate the possibility to realize Massera's theorem for certain classes of difference equations. To do this, we consider the class of linear difference equations. It is proved that a first-order linear homogeneous non-stationary periodic discrete equation has no strongly irregular non-stationary periodic solutions.

Keywords: difference periodic equations, periodic sequences, strongly irregular periodic solutions

For citation: Demenchuk A. K. Strongly irregular periodic solutions the first-order linear homogeneous discrete equation. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2018, vol. 62, no. 3, pp. 263–267 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-3-263-267>

Введение. Пусть \mathbb{N} , \mathbb{Z} и \mathbb{R} – соответственно множества натуральных, целых и действительных чисел, $y = (y_n) = (y(n))$ ($n \in \mathbb{N}$) – скалярная функция (последовательность), определенная на \mathbb{N} со значениями в \mathbb{R} , т. е. $y: \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}$. Множество таких последовательностей обозначим через S^1 . Далее будем считать, что пустые суммы и произведения членов последовательности $(y(n))$ равны соответственно 0 и 1, т. е. для $k \in \mathbb{N}$ и $m \in \mathbb{Z}$, $k > m$ имеем $\sum_{j=k}^m y_j = 0$ и $\prod_{j=k}^m y_j = 1$.

О п р е д е л е н и е 1. Последовательность $y \in S^1$ называется периодической с периодом $\omega \in \mathbb{N}$ (ω -периодической), если для любого $n \in \mathbb{N}$ выполняется равенство $y_{n+\omega} = y_n$.

Естественно, что если число ω – период последовательности y , то его кратные также будут периодами этой последовательности, т. е. для любых $n \in \mathbb{N}$, $m \in \mathbb{N}$ имеем $y(n+m\omega) = y(n)$. Поэтому в дальнейшем под периодом последовательности, как правило, будем понимать наименьший из периодов. В таком случае, в частности, всякая постоянная последовательность будет 1-периодической. Множество ω -периодических последовательностей обозначим через PS_ω^1 .

Периодические последовательности при определенных условиях могут быть решениями дискретных (разностных) уравнений. Проблеме существования и построения периодических решений дискретных уравнений посвящено достаточно большое число работ [1–4]. В указанных работах в основном изучались решения, период которых совпадает с периодом самого уравнения. Хотя полученные в этом направлении результаты во многом аналогичны соответствующим результатам для обыкновенных дифференциальных уравнений, тем не менее в некоторых случаях имеются значительные различия. Отметим одно из них.

Как известно [5; 6], нелинейное скалярное периодическое обыкновенное дифференциальное уравнение не имеет отличных от постоянных периодических решений таких, что периоды решения и уравнения несоизмеримы. Более того, Н. П. Еругин [7, с. 203] доказал, что такого рода решения отсутствуют у линейной нестационарной периодической системы двух уравнений. Представляется интересным исследовать подобные вопросы для дискретных уравнений. С этой целью рассмотрим уравнение

$$x_{n+1} = X(x_n, n), \quad n \in \mathbb{N}, \quad (1)$$

правая часть которого является ω -периодической, т. е. существует такое наименьшее $\omega \in \mathbb{N}$, что для любого фиксированного $n_0 \in \mathbb{N}$ выполняется равенство $X(x_{n_0}, n+\omega) = X(x_{n_0}, n)$ при всех $n \in \mathbb{N}$. Далее под периодом уравнения вида (1) будем понимать период его правой части.

По аналогии с [8] введем следующее

О п р е д е л е н и е 2. Периодическое решение с периодом Ω уравнения (1) такое, что числа ω и Ω взаимно просты, будем называть сильно нерегулярным.

В [9] показано, что при определенных условиях дискретное уравнение (1) может допускать сильно нерегулярное периодическое решение. Действительно, пусть m – произвольное нечетное число и $(h_n) \in PS_m^1$. Тогда дискретное m -периодическое уравнение $x_{n+1} = -x_n - (1 - x_n^2)h_n$ будет иметь сильно нерегулярное периодическое решение $x_n = (-1)^n$ периода $\Omega = 2$, который будет взаимно простым с числом m .

Постановка задачи. Как видим, теорема Массера [5] об отсутствии сильно нерегулярных периодических решений у скалярного обыкновенного уравнения для разностных уравнений, вообще говоря, полного аналога не имеет. В связи с этим возникает вопрос о возможности реализации аналога упомянутой теоремы Массера для более узких классов уравнений вида (1), в частности, линейных разностных уравнений, а именно: может ли линейное однородное нестационарное периодическое дискретное уравнение иметь сильно нерегулярные периодические решения, отличные от постоянных? Ответ на этот вопрос и является целью настоящего сообщения.

Основной результат. Рассмотрим линейное однородное периодическое дискретное уравнение

$$x_{n+1} = a_n x_n, \quad n \in \mathbb{N}, \quad a \in PS_\omega^1, \quad \omega \geq 2. \quad (2)$$

Будем интересоваться сильно нерегулярными Ω -периодическими решениями уравнения (2). Исследование разобьем на два случая.

1. Хотя бы один из коэффициентов a_n уравнения равен нулю.

Выберем наименьшее $k \in \mathbb{N}$ такое, что $a_k = 0$. Тогда из (2) вытекает, что для всех $n > k$ имеем $x_n = 0$. В таком случае общее решение (2) запишется в виде $x = (x_1, \dots, x_k, 0, 0, \dots)$. Это решение может быть периодическим только тогда, когда оно является тривиальным. Значит в данном случае разностное уравнение (2) не имеет отличного от постоянного периодического решения.

2. Все коэффициенты a_n уравнения отличны от нуля.

Пусть $a_n \neq 0$ при $n \in \mathbb{N}$. Предположим, что (2) имеет сильно нерегулярное Ω -периодическое решение (φ_n) , отличное от постоянного. Тогда выполняется цепочка равенств

$$\varphi_n = a_{n-1}\varphi_{n-1} = a_{n-1}a_{n-2}\varphi_{n-2} = \dots = a_{n-1}a_{n-2} \cdots a_2 a_1 \varphi_1,$$

откуда находим

$$\varphi_n = c \prod_{j=1}^{n-1} a_j, \quad n = 1, 2, \dots, \tag{3}$$

где $\varphi_1 = c$ – произвольная вещественная постоянная. Заметим, что если $c = 0$, то решение (3) уравнения (2) будет тривиальным. Поэтому при дальнейшем рассмотрении этот случай исключаем и считаем, что $c \neq 0$.

Согласно определению 1, функция (3) будет Ω -периодической в том и только в том случае, когда при любом $n \in \mathbb{N}$ выполняется равенство $\varphi_n = \varphi_{n+\Omega}$, т. е.

$$c \prod_{j=1}^{n-1} a_j = c \prod_{j=1}^{n+\Omega-1} a_j. \tag{4}$$

Равенства (4) можно записать в следующем виде:

$$c \prod_{j=1}^{n-1} a_j \left(1 - \prod_{j=n}^{n+\Omega-1} a_j\right) = 0.$$

Так как $c \neq 0$ и $a_j \neq 0$, $j \in \mathbb{N}$, то

$$\prod_{j=n}^{n+\Omega-1} a_j = 1, \quad n = 1, 2, \dots. \tag{5}$$

Покажем, что соотношения (5) могут выполняться лишь в том случае, когда последовательность (a_n) является Ω -периодической, т. е. $a_n = a_{n+\Omega}$, $n = 1, 2, \dots$. Действительно, выпишем первые два из равенств (5)

$$a_1 a_2 \cdots a_\Omega = 1, \quad a_2 a_3 \cdots a_\Omega a_{\Omega+1} = 1.$$

Умножая обе части второго равенства на a_1 , получаем

$$(a_1 a_2 a_3 \cdots a_\Omega) a_{\Omega+1} = a_1,$$

а значит, $a_{1+\Omega} = a_1$.

Далее, взяв второе и третье из равенств (5): $a_2 a_3 \cdots a_{\Omega+1} = 1$ и $a_3 a_4 \cdots a_{\Omega+1} a_{\Omega+2} = 1$, получаем

$$(a_2 a_3 a_4 \cdots a_{\Omega+1}) a_{\Omega+2} = a_2, \quad a_{2+\Omega} = a_2.$$

Продолжая этот процесс при произвольном $k \in \mathbb{N}$, имеем серию равенств

$$P_k = a_k a_{k+1} \cdots a_{\Omega+k-1} = 1, \quad P_{k+1} = a_{k+1} a_{k+2} \cdots a_{\Omega+k-1} a_{\Omega+k} = 1,$$

$$a_k = a_k P_{k+1} = P_k a_{\Omega+k} = a_{k+\Omega}.$$

Значит, для выполнения условия (5) функция (a_n) должна быть Ω -периодической.

Таким образом, получаем, что последовательность (a_n) имеет два периода ω и Ω , которые являются взаимно простыми числами. Как известно, любое натуральное число можно представить в виде линейной комбинации с целыми коэффициентами чисел ω и Ω .

Возьмем произвольное $n_0 \in \mathbb{N}$. Поскольку для любого $d \in \mathbb{N}$ найдутся такие $p, q \in \mathbb{Z}$, что $d = p\omega + q\Omega$, то верно равенство

$$a_{n_0+d} = a_{n_0+p\omega+q\Omega}. \quad (6)$$

Как показано ранее, последовательность (a_n) имеет периоды ω и Ω . Поэтому

$$a_{n_0+d} = a_{n_0} = \text{const} \quad (7)$$

при любом $d \in \mathbb{N}$. Из равенств (6), (7) в силу произвольности выбора $n_0 \in \mathbb{N}$ получаем $a_{n+d} = a_n = \text{const}$, $d \in \mathbb{N}$, т. е. последовательность (a_n) является постоянной, что противоречит неравенству $\omega \geq 2$.

Таким образом, имеет место аналог теоремы Массера для линейных однородных разностных уравнений. Другими словами, справедлива

Т е о р е м а. У линейного однородного нестационарного периодического дискретного уравнения (2) первого порядка отсутствуют сильно нерегулярные периодические решения, отличные от постоянного.

З а м е ч а н и е. Как следует из [3] уравнение (2) при определенных условиях может допускать ω -периодическое решение, отличное от постоянного.

З а к л ю ч е н и е. Для линейного однородного нестационарного периодического дискретного уравнения первого порядка имеет место аналог теоремы Массера об отсутствии у скалярного периодического обыкновенного дифференциального уравнения периодических решений таких, что период решения несоизмерим с периодом уравнения.

Благодарности. Работа выполнена в Институте математики НАН Беларуси в рамках Отдельного проекта фундаментальных и прикладных научных исследований НАН Беларуси «Исследование свойств спектров дискретных систем при возмущениях их коэффициентов».

Acknowledgements. The work was carried out at the Institute of Mathematics of the National Academy of Sciences of Belarus within the framework of the Special Project of Fundamental and Applied Scientific Research of the National Academy of Sciences of Belarus “Investigation of the properties of the spectra of discrete systems under perturbations of their coefficients”.

Список использованных источников

1. Agarwal, R. P. *Difference Equations and Inequalities. Theory, Methods and Applications* / R. P. Agarwal. – New York: Marcel Dekker, Inc., 1992. – 777 p.
2. Agarwal, R. P. Periodic Solutions of First Order Linear Difference Equations / R. F. Agarwal, J. Pospenda // *Mathl. Comput. Modelling*. – 1995. – Vol. 22, N 1. – P. 11–19. [https://doi.org/10.1016/0895-7177\(95\)00096-k](https://doi.org/10.1016/0895-7177(95)00096-k)
3. Janglajew, K. R. Periodicity of solutions of nonhomogeneous linear difference equations / K. R. Janglajew, E. L. Schmeidel // *Advances in Difference Equations*. – 2012. – Vol. 2012, N 1. – P. 195. <https://doi.org/10.1186/1687-1847-2012-195>
4. Elaydi, S. *An Introduction to Difference Equations* / S. Elaydi. – Third Ed. – Springer, 2005. – 540 p.
5. Massera, J. L. Observaciones sobre las soluciones periodicas de ecuaciones diferenciales / J. L. Massera // *Bol. de la Facultad de Ingenieria, Montevideo*. – 1950. – Vol. 4, N 1. – P. 37–45.
6. Курцвейль, Я. О периодических и почти периодических решениях систем обыкновенных дифференциальных уравнений / Я. Курцвейль, О. Вейвода // *Чехосл. матем. журн.* – 1955. – Т. 5, № 3. – С. 362–370.
7. Еругин, Н. П. Линейные системы дифференциальных уравнений с периодическими и квазипериодическими коэффициентами / Н. П. Еругин. – Минск: Изд-во Акад. наук БССР, 1963. – 272 с.
8. Деменчук, А. К. Асинхронные колебания в дифференциальных системах. Условия существования и управления / А. К. Деменчук. – Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 2012. – 186 с.
9. Ласунский, А. В. О периоде решений дискретного периодического логистического уравнения / А. В. Ласунский // *Тр. Карельского научного центра РАН*. – 2012. – № 5. – С. 44–48.

References

1. Agarwal R. P. *Difference Equations and Inequalities. Theory, Methods and Applications*. New York, Marcel Dekker, Inc., 1992. 777 p.
2. Agarwal R. P., Pospenda J. Periodic Solutions of First Order Linear Difference Equations. *Mathematical and Computer Modelling*, 1995, vol. 22, no. 1, pp. 11–19. [https://doi.org/10.1016/0895-7177\(95\)00096-k](https://doi.org/10.1016/0895-7177(95)00096-k)
3. Janglajew K. R., Schmeidel E. L. Periodicity of solutions of nonhomogeneous linear difference equations. *Advances in Difference Equations*, 2012, vol. 2012, no. 1, pp. 195. <https://doi.org/10.1186/1687-1847-2012-195>
4. Elaydi S. *An Introduction to Difference Equations*. Third Ed. Springer, 2005. 540 p.

5. Massera J. L. Observaciones sobre las soluciones periodicas de ecuaciones diferenciales. *Boletin de la Facultad de Ingenieria y agrimensura de Montevideo*, 1950, vol. 4, no. 1, pp. 37–45 (in Spanish).
6. Kurzweil J., Veivoda O. On periodic and almost periodic solutions of the ordinary differential systems. *Chechoslovatskii matematicheskii zhurnal = Czechoslovak mathematical journal*, 1955, vol. 5, no. 3, pp. 362–370 (in Russian).
7. Erugin N. P. *Linear Systems of Ordinary Differential Equations with Periodic and Quasiperiodic Coefficients*. Minsk, Publishing house of the Academy of Sciences BSSR, 1963. 272 p. (in Russian).
8. Demenchuk A. K. *Asynchronous oscillations in differential systems. Conditions of existence and control*. Saarbrucken, LAP Lambert Academic Publishing, 2012. 186 p. (in Russian).
9. Lasunskii A. V. On the period of solutions of the discrete periodic logistic equation. *Trudy Karelskogo nauchnogo centra Rossiiskoi akademii nauk = Transactions of Karelian research centre of Russian Academy of Science*, 2012, no. 5, pp. 44–48 (in Russian).

Информация об авторе

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

Information about the author

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

ФИЗИКА
PHYSICSУДК 536.424
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-3-268-273>Поступило в редакцию 14.03.2018
Received 14.03.2018**Член-корреспондент И. О. Троянчук¹, М. В. Бушинский¹, Н. В. Терешко¹, А. Н. Чобот¹,
О. С. Мانتыцкая¹, Г. М. Чобот², В. М. Добрянский², С. Н. Пастушонок³**¹НПЦ НАН Беларуси по материаловедению, Минск, Республика Беларусь²Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск, Республика Беларусь³Военная академия Республики Беларусь, Минск, Республика Беларусь**ПРИЧИНА МЕТАМАГНИТНОГО ПЕРЕХОДА В $\text{EuMn}_{0,5}\text{Co}_{0,5}\text{O}_3$**

Аннотация. Исследованы магнитные свойства перовскита $\text{EuMn}_{0,5}\text{Co}_{0,5}\text{O}_3$, полученного при различных условиях синтеза. Показано, что образец, полученный при 1500 °С, проявляет метамгнитный переход, тогда как у образца, полученного при 1200 °С, наблюдалась полевая зависимость намагниченности, характерная для ферромагнетиков. Оба образца имеют температуру Кюри $T_C = 123$ К и приблизительно равную намагниченность в больших магнитных полях. Метамгнетизм связан с переходом из неколлинеарной в коллинеарную магнитную фазу, тогда как наличие кластеров с упорядочением ионов Co^{2+} и Mn^{4+} ведет к ферромагнетизму. Неколлинеарная фаза образуется вследствие конкуренции положительных Co^{2+} – Mn^{4+} и отрицательных Mn^{4+} – Mn^{4+} , Co^{2+} – Co^{2+} взаимодействий, а также наличия большой магнитной анизотропии.

Ключевые слова: обменное взаимодействие, намагниченность, фазовые превращения, магнитные материалы**Для цитирования:** Причина метамгнитного перехода в $\text{EuMn}_{0,5}\text{Co}_{0,5}\text{O}_3$ / И. О. Троянчук [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 3. – С. 268–273. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-3-268-273>**Corresponding Member Igor O. Troyanchuk¹, Maxim V. Bushinsky¹, Nina V. Tereshko¹, Aleksandra N. Chobot¹,
Olga S. Mantyskaya¹, Gennadii M. Chobot², Valerij M. Dobraynsky², Sofija N. Pastushonok³**¹Scientific-Practical Materials Research Centre of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus²Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Republic of Belarus³Military Academy of the Republic of Belarus, Minsk, Republic of Belarus**REASON FOR A METAMAGNETIC TRANSITION IN $\text{EuMn}_{0,5}\text{Co}_{0,5}\text{O}_3$**

Abstract. The magnetic properties of perovskite $\text{EuMn}_{0,5}\text{Co}_{0,5}\text{O}_3$, obtained under different synthesis conditions, have been studied. It is shown that the sample obtained at 1500 °C exhibits a metamagnetic transition, whereas in the sample obtained at 1200 °C, the field dependence of magnetization as in a ferromagnet was observed. The both samples have $T_C = 123$ K and approximately equal to magnetization in large magnetic fields. Metamagnetism is associated with a transition from a noncollinear to a collinear magnetic phase, whereas the presence of clusters with the ordering of Co^{2+} and Mn^{4+} ions leads to ferromagnetism. The noncollinear phase is formed due to the competition of positive Co^{2+} – Mn^{4+} and negative Mn^{4+} – Mn^{4+} , Co^{2+} – Co^{2+} interactions and due to large magnetic anisotropy.

Keywords: exchange interactions, magnetization, phase transitions, magnetic materials**For citation:** Troyanchuk I. O., Bushinsky M. V., Tereshko N. V., Chobot A. N., Mantyskaya O. S., Chobot G. M., Dobraynsky V. M., Pastushonok S. N. Reason for a metamagnetic transition in $\text{EuMn}_{0,5}\text{Co}_{0,5}\text{O}_3$. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2018, vol. 62, no. 3, pp. 268–273 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-3-268-273>

Введение. Редкоземельные манганиты RMnO_3 (R – редкоземельный ион) со структурой перовскита вызывают повышенный интерес у исследователей благодаря колоссальному магнито-резистивному эффекту, обнаруженному в этих соединениях [1]. Магнитное состояние этих соединений можно изменить с антиферромагнитного на ферромагнитное либо путем замещения

трехвалентных редкоземельных ионов двухвалентными ионами Ca, Sr, Ba [2], либо замещением ионов марганца ионами переходных металлов, например, Co или Ni [3].

Согласно работам [3; 4], ферромагнитное упорядочение в системе $\text{LaMn}_{1-x}\text{M}_x\text{O}_3$ ($\text{M} = \text{Co}, \text{Ni}$) наблюдается в диапазоне $0,2 \leq x \leq 0,5$. Обнаружено, что составы с $x = 0,5$ имеют наибольшую температуру Кюри, которая для составов $\text{LaMn}_{0,5}\text{Co}_{0,5}\text{O}_3$ и $\text{LaMn}_{0,5}\text{Ni}_{0,5}\text{O}_3$ может достигать 240 и 280 К соответственно. Гуденаф предположил, что ионы Mn, Co и Ni в этих соединениях находятся в одинаковом окислительном состоянии 3^+ [3]. Поскольку ионы трехвалентного кобальта в низкоспиновом состоянии являются диамагнитными, то ферромагнетизм в этом случае обусловлен сверхобменными взаимодействиями $\text{Mn}^{3+}-\text{O}-\text{Mn}^{3+}$ [3]. Исследование перовскитов $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}(\text{Mn}_{1-x}\text{M}_x)\text{O}_3$ (M – металл), содержащих ионы Mn^{3+} и немагнитные ионы Ti^{4+} или Nb^{5+} , показало, что сверхобменные взаимодействия $\text{Mn}^{3+}-\text{O}-\text{Mn}^{3+}$ могут быть положительными [4]. Кроме того, ферромагнетизм составов $\text{RMn}_{1-x}\text{M}_x\text{O}_3$ рассматривался в рамках концепции двойных обменных взаимодействий $\text{Mn}^{3+}-\text{O}-\text{Mn}^{4+}$ [5; 6], а также сверхобменных взаимодействий $\text{Mn}^{4+}-\text{O}-\text{Mn}^{2+}$ [7–9]. Так, в [7] было предположено, что ферромагнетизм $\text{LaMn}_{0,5}(\text{Co},\text{Ni})_{0,5}\text{O}_3$ обусловлен сверхобменными магнитными взаимодействиями $\text{Mn}^{4+}-\text{O}-\text{Co}^{2+}(\text{Ni}^{2+})$, поскольку разновалентное состояние ионов $\text{Co}^{2+}(\text{Ni}^{2+})$ и Mn^{4+} является более стабильным, чем состояние только из трехвалентных ионов $\text{Co}^{3+}(\text{Ni}^{3+})$ и Mn^{3+} .

В [10–12] было показано, что система $\text{LaMn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$ в зависимости от условий получения может иметь разные кристаллоструктурные искажения и проявлять различные магнитные свойства. Согласно результатам, полученным в этих работах, в составе $\text{LaMn}_{0,5}\text{Co}_{0,5}\text{O}_3$ существует две ферромагнитные фазы с различными температурами Кюри из-за различных окислительных состояний ионов и типов сверхобменных взаимодействий, характерных для этих фаз. Было предположено, что в фазе с более высокой температурой Кюри ионы Co находятся в трехвалентном низкоспиновом состоянии и ферромагнетизм возникает за счет положительных сверхобменных взаимодействий $\text{Mn}^{3+}-\text{O}-\text{Mn}^{3+}$. В другой фазе, которая имеет более низкую температуру Кюри, ферромагнитное упорядочение возникает благодаря $\text{Mn}^{4+}-\text{O}-\text{Co}^{2+}$ сверхобменным взаимодействиям [10; 11]. Подобное магнитное фазовое расслоение было обнаружено также в составах $\text{RMn}_{0,5}\text{Co}_{0,5}\text{O}_3$ ($\text{R} = \text{La}, \text{Pr}, \text{Nd}, \text{Sm}, \text{Eu}, \text{Gd}, \text{Tb}, \text{Dy}$) [12; 13].

Близким аналогом системы $\text{LaMn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$ является менее изученная система $\text{EuMn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$, содержащая немагнитные ионы Eu^{3+} . Температура ферромагнитного упорядочения в этой системе возрастает с увеличением концентрации ионов Co, может достигать максимального значения $T_C = 140$ К в составе $\text{EuMn}_{0,5}\text{Co}_{0,5}\text{O}_3$, а затем падает в составах с большой концентрацией ионов Co [14]. Исследование валентных состояний методом рентгеновской спектроскопии и магнитных свойств разупорядоченного перовскита $\text{EuMn}_{0,5}\text{Co}_{0,5}\text{O}_3$ выявило, что ионы Co и Mn находятся в окислительном состоянии 2^+ и 4^+ соответственно, а содержание ионов с другой валентностью очень мало [15]. Из измерений магнитной восприимчивости и удельной теплоемкости было обнаружено формирование магнитоупорядоченного состояния при $T_C \sim 120$ К, которое проявляет как ферромагнитные, так и спин-стекольные магнитные свойства [15]. Предположено, что во внешнем магнитном поле антиферромагнитные кластеры вызывают метамагнитный фазовый переход первого рода [15]. Однако метамагнитный переход проявляет черты кооперативного явления [14], что не согласуется с этой гипотезой. Для выяснения причины данного метамагнитного перехода нами были изучены магнитные свойства образцов состава $\text{EuMn}_{0,5}\text{Co}_{0,5}\text{O}_3$, полученных при различных температурах синтеза.

Материалы и методы исследования. Образцы состава $\text{EuMn}_{0,5}\text{Co}_{0,5}\text{O}_3$ были получены методом твердофазных реакций по обычной керамической технологии на воздухе. Исходные простые оксиды высокой чистоты Eu_2O_3 , Co_3O_4 и Mn_2O_3 были взяты в стехиометрическом соотношении и тщательно смешаны (260 об/мин, 30 мин) в планетарной шаровой мельнице фирмы RETSCH PM-100. Синтез проводился в два этапа. На первом этапе образцы обжигались при температуре 1120 °С в течение 10 ч и затем охлаждались вместе с печью 10 ч. На втором этапе получено два разных образца, один из которых синтезирован при температуре 1200 °С в течение 4 ч, температура синтеза другого была максимально возможной – 1500 °С, время синтеза – 3 ч для повышения гомогенности. После синтеза образцы обеих серий быстро охлаждались с выключен-

ченной печи. Рентгенофазовый анализ, выполненный на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3М, показал, что образцы обеих серий были однофазными и имели орторомбически искаженную элементарную ячейку. Температурные и полевые измерения намагниченности были выполнены на универсальной установке для измерения физических свойств фирмы Cryogenic Ltd.

Результаты и их обсуждение. Согласно рентгеновским исследованиям оба образца, полученные при 1200 и 1500 °С, имеют одинаковую орторомбически искаженную кристаллическую структуру (пространственная группа $Pnma$) с приблизительно одинаковыми параметрами элементарной ячейки: $a = 5,567(6)$ Å, $b = 7,563(8)$ Å, $c = 5,321(5)$ Å и $a = 5,570(5)$ Å, $b = 7,566(7)$ Å, $c = 5,319(4)$ Å соответственно (рис. 1). Признаков упорядочения ионов Co^{2+} и Mn^{4+} в обоих образцах не обнаружено.

Температурные зависимости намагниченности образцов $EuMn_{0,5}Co_{0,5}O_3$, измеренные в почти нулевом поле, показаны на рис. 2. Оба образца ферромагнитно упорядочиваются при 123 К и в малых полях ($H = 2$ Э) их намагниченность очень близка. Однако в малых полях кооперативное ферромагнитное упорядочение происходит по-разному. Спонтанная намагниченность в образце, синтезированном при 1500 °С, возникает резко, тогда как спонтанная намагниченность образца, синтезированного при 1200 °С, возникает на фоне подъема намагниченности, обусловленной присутствием ферромагнитных кластеров со значительно большей силой обменных взаимодействий, чем в фазе с $T_C = 123$ К. Можно предположить, что ферромагнитное состояние в этих кластерах обусловлено упорядочением ионов Co^{2+} и Mn^{4+} , что приводит к минимизации

вклада от антиферромагнитных сверхобменных взаимодействий $Mn^{4+}-O-Mn^{4+}$ и $Co^{2+}-O-Co^{2+}$ и является причиной неустойчивого основного магнитного состояния.

В полях больше 1 кЭ температурная зависимость намагниченности образца, полученного при 1500 °С, становится аномальной и переход в магнитоупорядоченное состояние в режиме охлаждения в поле характеризуется наличием максимума вблизи T_C . Намагниченность становится гораздо меньшей, чем у образца, полученного при 1200 °С, для которого характерно обычное поведение спонтанной намагниченности при охлаждении в поле (рис. 3).

Полевые зависимости намагниченности, полученные при 5 и 50 К после охлаждения в поле 500 Э, принципиально разные для обоих образцов (рис. 4). Образец, полученный при 1200 °С, проявляет обычное поведение намагниченности с очень большой коэрцитивной силой ($H_C = 24$ кЭ, $T = 5$ К) и отсутствием насыщения в поле до 140 кЭ. Это указывает на магнитную негетомогенность ферромагнитного состояния, обусловленную наличием антиферромагнитных нанокластеров. Образец, полученный при 1500 °С, имеет в два раза меньшую остаточную намагниченность. Зависимость намагниченности от поля носит линейный характер вплоть до $H \sim 40$ кЭ, при котором начинается переход в другое магнитное состояние. Этот переход является необратимым при температуре 5 К, так как петля гистерезиса становится обычной и не меняется при по-

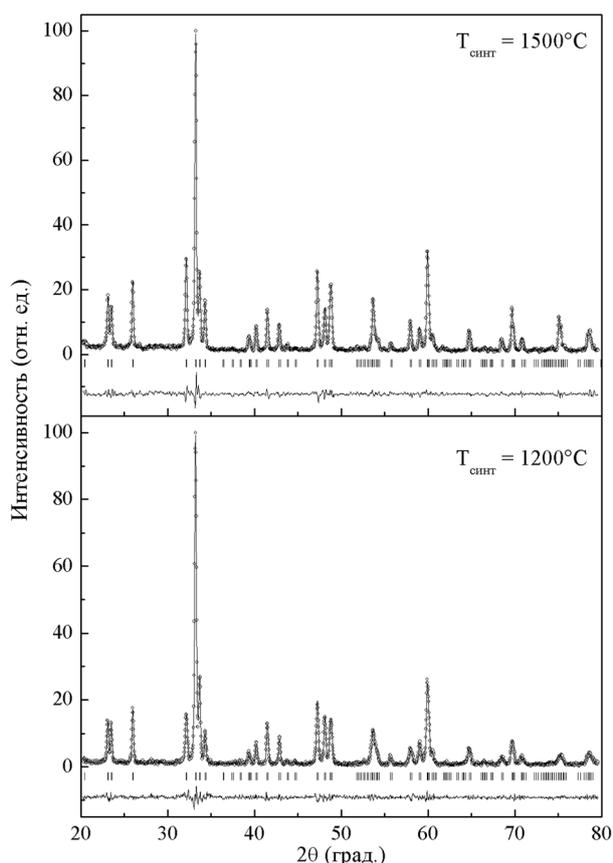


Рис. 1. Рентгенограммы образцов, полученных при 1500 и 1200 °С. Экспериментальные данные изображены кружками, рассчитанные – сплошной линией. Внизу показана разность между измеренными и рассчитанными данными

Fig. 1. X-ray patterns of the samples obtained at 1500 and 1200 °С. The experimental data are represented by circles, calculated by a solid line. The difference between the measured and calculated data is shown below

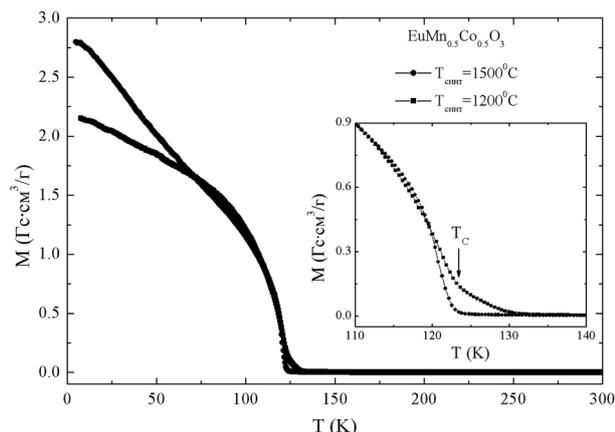


Рис. 2. Температурные зависимости намагниченности, измеренные в магнитном поле 2 Э

Fig. 2. Temperature dependences of magnetization measured in a magnetic field of 2 Oe

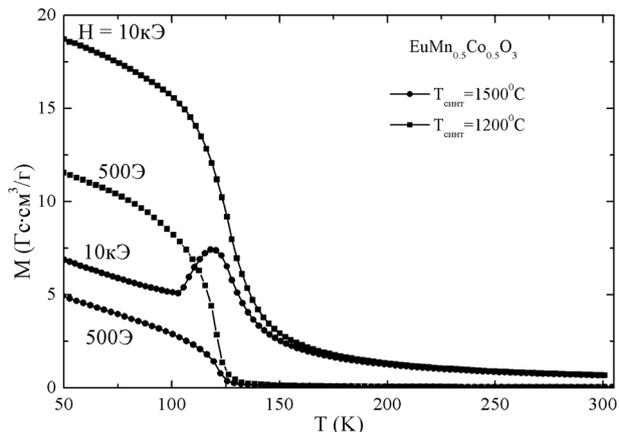


Рис. 3. Температурные зависимости FC-намагниченности в различных полях

Fig. 3. Temperature dependences of FC-magnetization in different fields

вторном цикле переключения поля. Иное поведение полевой зависимости намагниченности при 50 К проявляет образец, синтезированный при 1500 °С. При этой температуре метамагнитный переход становится обратимым, так как намагниченность после частичного снятия поля равна намагниченности, измеренной на линейном участке после повышения поля. Гистерезис обусловлен тем, что происходит фазовый переход первого рода со сменой типа магнитного упорядочения. После перехода остаточная намагниченность увеличивается более чем в 2 раза: с $0,3\mu_B/\text{ф.е.}$ до $0,65\mu_B/\text{ф.е.}$ при $T = 5$ К. Критическое поле $H_{\text{кр}}$, при котором начинается переход, уменьшается с ростом температуры от 60 кЭ ($T = 5$ К) до $\sim 1,5$ кЭ ($T = 120$ К). Низкополевая фаза в метамагнитном образце не может быть обусловлена антипараллельным упорядочением магнитных моментов ионов Co^{2+} и Mn^{4+} , так как эти ионы в основном статистически распределены. Кроме того, обменное взаимодействие $\text{Co}^{2+}-\text{Mn}^{4+}$ является ферромагнитным. Эта фаза также не может быть обусловлена антиферромагнитными кластерами, так как метамагнетизм обнаруживает черты кооперативного явления с хорошо выраженным критическим полем $H_{\text{кр}}$ (рис. 4). Поэтому можно предположить, что метамагнитное фазовое превращение обусловлено переходом из неколлинеарного магнитного состояния в коллинеарное ферромагнитное. Антиферромагнитная компонента обусловлена конкуренцией отрицательных магнитных взаимодействий $\text{Mn}^{4+}-\text{Mn}^{4+}$, $\text{Co}^{2+}-\text{Co}^{2+}$ и положительных $\text{Co}^{2+}-\text{Mn}^{4+}$. Очень большая магнитная анизотропия приводит к устойчивому типу магнитного состояния. Действительно, в $\text{RNi}_{0,5}\text{Mn}_{0,5}\text{O}_3$ с малой величиной магнитной анизотропии метамагнетизма не наблюдалось. Ферромагнитные нанокластеры дестабилизируют неколлинеарную магнитную структуру, переводя ее в коллинеарную.

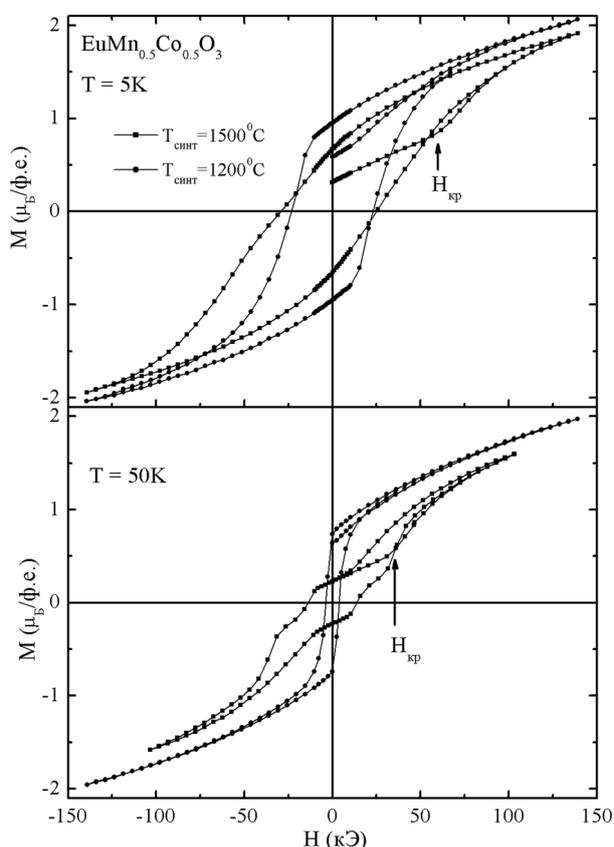


Рис. 4. Петли гистерезиса образцов, полученных при 1200 и 1500 °С, снятые при 5 и 50 К

Fig. 4. Hysteresis loops of the samples obtained at 1200 and 1500 °C, measured at 5 and 50 K

Заклучение. Проведено исследование магнитных свойств двух образцов $\text{EuCo}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{O}_3$, полученных при температурах 1200 и 1500 °С. Рентгеноструктурные исследования показали, что образцы имеют орторомбическую структуру перовскита (пространственная группа *Pnma*). Признаков упорядочения ионов Co^{2+} и Mn^{4+} не выявлено. Согласно магнитным измерениям, оба образца проявляют спонтанную намагниченность, температура Кюри $T_C = 123$ К. Однако образец, полученный при 1200 °С, при температуре выше 123 К обладал большой магнитной восприимчивостью вследствие наличия ферромагнитных кластеров с упорядочением ионов Co^{2+} и Mn^{4+} . При температуре ниже 123 К он находился в ферромагнитном состоянии. В образце, полученном при 1500 °С, был обнаружен метамгнитный переход, который становился необратимым при низкой температуре. Магнитные свойства указывают на то, что этот переход обусловлен переходом из неколлинеарной в коллинеарную ферромагнитную фазу. Неколлинеарная магнитная фаза образуется вследствие конкуренции антиферромагнитных Mn^{4+} – Mn^{4+} , Co^{2+} – Co^{2+} и ферромагнитных Co^{2+} – Mn^{4+} обменных взаимодействий, а также наличия сильной магнитной анизотропии.

Благодарности. Работа поддержана Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований (проекты Ф17Д-007 и Ф16К-066).

Acknowledgements. The work is supported by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (Projects Ф17Д-007 and Ф16К-066).

Список использованных источников

1. Coe, J. M. D. Mixed-valence manganites / J. M. D. Coe., M. Viret, S. von Molnár // *Advances in Physics*. – 1999. – Vol. 48, N 2. – P. 167–293. <https://doi.org/10.1080/000187399243455>
2. Jonker, G. H. Ferromagnetic compounds of manganese with perovskite structure / G. H. Jonker, J. H. van Santen // *Physica*. – 1950. – Vol. 16, N 3. – P. 337–349. [https://doi.org/10.1016/0031-8914\(50\)90033-4](https://doi.org/10.1016/0031-8914(50)90033-4)
3. Relationship between crystal symmetry and magnetic properties of ionic compounds containing Mn^{3+} / J. B. Goodenough [et al.] // *Phys. Rev.* – 1961. – Vol. 124, N 2. – P. 373–384. <https://doi.org/10.1103/physrev.124.373>
4. Magnetic interaction in Mg, Ti, Nb doped manganites / I. O. Troyanchuk [et al.] // *Eur. Phys. J. B.* – 2002. – Vol. 28, N 1. – P. 75–80. <https://doi.org/10.1140/epjb/e2002-00202-2>
5. Park, J.-H. Double-exchange ferromagnetism in $\text{La}(\text{Mn}_{1-x}\text{Co}_x)\text{O}_3$ / J.-H. Park, S.-W. Cheong, C. T. Chen // *Phys. Rev. B.* – 1997. – Vol. 55, N 17. – P. 11072–11075. <https://doi.org/10.1103/physrevb.55.11072>
6. Double-exchange ferromagnetism and magnetoresistance in $\text{LaMn}_{1-x}\text{Cu}_x\text{O}_3$ ($x \leq 0.3$) / Y. Sun [et al.] // *Appl. Phys. Lett.* – 2000. – Vol. 77, N 17. – P. 2734–2736. <https://doi.org/10.1063/1.1320021>
7. Blasse, G. Ferromagnetic interactions in non-metallic perovskites / G. Blasse // *J. Phys. Chem. Solids*. – 1965. – Vol. 26, N 12. – P. 1969–1971. [https://doi.org/10.1016/0022-3697\(65\)90231-3](https://doi.org/10.1016/0022-3697(65)90231-3)
8. Jonker, G. H. Magnetic and semiconducting properties of perovskites containing manganese and cobalt / G. H. Jonker // *J. Appl. Phys.* – 1966. – Vol. 37, N 3. – P. 1424–1430. <https://doi.org/10.1063/1.1708498>
9. Nishimori, N. NMR study on the supertransferred hyperfine magnetic field at ^{55}Mn in ferromagnetic perovskites $\text{La}(\text{Co}_{1-x}\text{Mg}_x)_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{O}_3$ / N. Nishimori, K. Asai, M. Mizoguchi // *J. Phys. Soc. Jpn.* – 1995. – Vol. 64, N 4. – P. 1326–1333. <https://doi.org/10.1143/jpsj.64.1326>
10. Joy, P. A. Spin states of Mn and Co in $\text{LaMn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{O}_3$ / P. A. Joy, Y. B. Kholam, S. K. Date // *Phys. Rev. B.* – 2000. – Vol. 62, N 13. – P. 8608–8610. <https://doi.org/10.1103/physrevb.62.8608>
11. The origin of ferromagnetism in the two different phases of $\text{LaMn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{O}_3$: evidence from x-ray photoelectron spectroscopic studies / V. L. Joseph Joly [et al.] // *J. Phys.: Condens. Matter*. – 2001. – Vol. 13, N 4. – P. 649–656. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/13/4/311>
12. Joseph Joly, V. L. Effect of R on the magnetic transition temperature of $\text{RMn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{O}_3$ / V. L. Joseph Joly, P. A. Joy, S. K. Date // *Solid State Commun.* – 2002. – Vol. 121, N 4. – P. 219–222. [https://doi.org/10.1016/s0038-1098\(01\)00456-2](https://doi.org/10.1016/s0038-1098(01)00456-2)
13. Joseph Joly, V. L. Synthesis of two different ferromagnetic phases of $\text{RMn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{O}_3$ (R = Pr, Nd, Sm) by a low-temperature method / V. L. Joseph Joly, P. A. Joy, S. K. Date // *Materials Letters*. – 2001. – Vol. 51, N 2. – P. 172–176. [https://doi.org/10.1016/s0167-577x\(01\)00285-3](https://doi.org/10.1016/s0167-577x(01)00285-3)
14. Magnetic phase diagrams of the $\text{Ln}(\text{Mn}_{1-x}\text{Co}_x)\text{O}_3$ (Ln = Eu, Nd, Y) systems / I. O. Troyanchuk [et al.] // *J. Appl. Phys.* – 2000. – Vol. 88, N 1. – P. 360–367. <https://doi.org/10.1063/1.373668>
15. Valence states and metamagnetic phase transition in partially B-site-disordered perovskite $\text{EuMn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{O}_3$ / A. N. Vasiliiev [et al.] // *Phys. Rev. B.* – 2008. – Vol. 77, N 10. – P. 104442-1–104442-5. <https://doi.org/10.1103/physrevb.77.104442>

References

1. Coe J. M. D., Viret M., von Molnár S. Mixed-valence manganites. *Advances in Physics*, 1999, vol. 48, no. 2, pp. 167–293. <https://doi.org/10.1080/000187399243455>
2. Jonker G. H., Van Santen J. H. Ferromagnetic compounds of manganese with perovskite structure. *Physica*, 1950, vol. 16, no. 3, pp. 337–349. [https://doi.org/10.1016/0031-8914\(50\)90033-4](https://doi.org/10.1016/0031-8914(50)90033-4)
3. Goodenough J. B., Wold A., Arnott R. J., Menyuk N. Relationship between crystal symmetry and magnetic properties of ionic compounds containing Mn^{3+} . *Physical Review*, 1961, vol. 124, no. 2, pp. 373–384. <https://doi.org/10.1103/physrev.124.373>
4. Troyanchuk I. O., Bushinsky M. V., Szymczak H., Bärner K., Maignan A. Magnetic interaction in Mg, Ti, Nb doped manganites. *The European Physical Journal B – Condensed Matter*, 2002, vol. 28, no. 1, pp. 75–80. <https://doi.org/10.1140/epjb/e2002-00202-2>
5. Park J.-H., Cheong S.-W., Chen C. T. Double-exchange ferromagnetism in $\text{La}(\text{Mn}_{1-x}\text{Co}_x)\text{O}_3$. *Physical Review B*, 1997, vol. 55, no. 17, pp. 11072–11075. <https://doi.org/10.1103/physrevb.55.11072>

6. Sun Y., Xu X., Tong W., Zhang Y. Double-exchange ferromagnetism and magnetoresistance in $\text{LaMn}_{1-x}\text{Cu}_x\text{O}_3$ ($x \leq 0.3$). *Applied Physics Letters*, 2000, vol. 77, no. 17, pp. 2734–2736. <https://doi.org/10.1063/1.1320021>
7. Blasse G. Ferromagnetic interactions in non-metallic perovskites. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 1965, vol. 26, no. 12, pp. 1969–1971. [https://doi.org/10.1016/0022-3697\(65\)90231-3](https://doi.org/10.1016/0022-3697(65)90231-3)
8. Jonker G. H. Magnetic and semiconducting properties of perovskites containing manganese and cobalt. *Journal of Applied Physics*, 1966, vol. 37, no. 3, pp. 1424–1430. <https://doi.org/10.1063/1.1708498>
9. Nishimori N., Asai K., Mizoguchi M. NMR study on the supertransferred hyperfine magnetic field at ^{55}Mn in ferromagnetic perovskites $\text{La}(\text{Co}_{1-x}\text{Mg}_x)_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{O}_3$. *Journal of the Physicists Society of Japan*, 1995, vol. 64, no. 4, pp. 1326–1333. <https://doi.org/10.1143/jpsj.64.1326>
10. Joy P. A., Kholam Y. B., Date S. K. Spin states of Mn and Co in $\text{LaMn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{O}_3$. *Physical Review B*, 2000, vol. 62, no. 13, pp. 8608–8610. <https://doi.org/10.1103/physrevb.62.8608>
11. Joseph Joly V. L., Joy P. A., Date S. K., Gopinath C. S. The origin of ferromagnetism in the two different phases of $\text{LaMn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{O}_3$: evidence from x-ray photoelectron spectroscopic studies. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2001, vol. 13, no. 4, pp. 649–656. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/13/4/311>
12. Joseph Joly V. L., Joy P. A., Date S. K. Effect of R on the magnetic transition temperature of $\text{RMn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{O}_3$. *Solid State Communications*, 2002, vol. 121, no. 4 pp. 219–222. [https://doi.org/10.1016/s0038-1098\(01\)00456-2](https://doi.org/10.1016/s0038-1098(01)00456-2)
13. Joseph Joly V. L., Joy P. A., Date S. K. Synthesis of two different ferromagnetic phases of $\text{RMn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{O}_3$ (R = Pr, Nd, Sm) by a low-temperature method. *Materials Letters*, 2001, vol. 51, no. 2, pp. 172–176. [https://doi.org/10.1016/s0167-577x\(01\)00285-3](https://doi.org/10.1016/s0167-577x(01)00285-3)
14. Troyanchuk I. O., Khalyavin D. D., Lynn J. W., Erwin R. W., Huang Q., Szymczak H., Szymczak R., Baran M. Magnetic phase diagrams of the $\text{Ln}(\text{Mn}_{1-x}\text{Co}_x)\text{O}_3$ (Ln = Eu, Nd, Y) systems. *Journal Applied Physics*, 2000, vol. 88, no. 1, pp. 360–367. <https://doi.org/10.1063/1.373668>
15. Vasiliev A. N., Volkova O. S., Lobanovskii L. S., Troyanchuk I. O., Hu Z., Tjeng L. H., Khomskii D. I., Lin H.-J., Chen C. T., Tristan N., Kretzschmar F., Klingeler R., Büchner B. Valence states and metamagnetic phase transition in partially B-site-disordered perovskite $\text{EuMn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{O}_3$. *Physical Review B*, 2008, vol. 77, no. 10, pp. 104442-1–104442-5. <https://doi.org/10.1103/physrevb.77.104442>

Информация об авторах

Троянчук Игорь Олегович – член-корреспондент, д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий лабораторией. Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: troyan@physics.by.

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

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

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

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

Чобот Геннадий Михайлович – канд. физ.-мат. наук, доцент. Белорусский государственный аграрный технический университет (пр. Независимости, 99, 220023, Минск, Республика Беларусь). E-mail: g.m.chobot@tut.by.

Добрянский Валерий Михайлович – д-р техн. наук, профессор. Белорусский государственный аграрный технический университет (пр. Независимости, 99, 220023, Минск, Республика Беларусь). E-mail: dobryanal@mail.ru.

Пастушонко Софья Николаевна – канд. физ.-мат. наук, доцент. Военная академия Республики Беларусь (пр. Независимости, 220, 220057, Минск, Республика Беларусь). E-mail: sn195333@gmail.com.

Information about the authors

Troyanchuk Igor Olegovich – Corresponding Member, D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Laboratory. Scientific and Practical Materials Research Centre of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: troyan@physics.by.

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

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

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

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

Chobot Gennadii Mihailovich – Ph. D. (Physics and Mathematics), Assistant Professor. Belarusian State Agrarian Technical University (99, Nezavisimosti Ave., 220023, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: g.m.chobot@tut.by.

Dobryansky Valerij Mihailovich – D. Sc. (Engineering), Professor. Belarusian State Agrarian Technical University (99, Nezavisimosti Ave., 220023, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dobryanal@mail.ru.

Pastushonok Sofija Nikolaevna – Ph. D. (Physics and Mathematics), Assistant Professor. Military Academy of the Republic of Belarus (220, Nezavisimosti Ave., 220057, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sn195333@gmail.com.

ISSN 1561-8323 (Print)

ISSN 2524-2431 (Online)

УДК 539.12

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-3-274-280>

Поступило в редакцию 11.05.2018

Received 11.05.2018

Е. М. Овсиюк¹, Я. А. Войнова², В. М. Редьков³¹*Мозырский государственный педагогический университет им. И. П. Шамякина, Мозырь, Республика Беларусь*²*Минское суворовское военное училище, Минск, Республика Беларусь*³*Институт физики им. Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь***РЕШЕНИЯ ФРОБЕНИУСА И АНАЛИЗ ТУННЕЛЬНОГО ЭФФЕКТА
ДЛЯ ЧАСТИЦЫ СО СПИНОМ 1/2 В ПОЛЕ ШВАРЦШИЛЬДА***(Представлено членом-корреспондентом Л. М. Томильчиком)*

Аннотация. Выполнено исследование эффекта туннелирования дираковских частиц через эффективный потенциальный барьер, порождаемый статической метрикой черной дыры Шварцшильда. Исследование основано на использовании решений Фробениуса возникающего дифференциального уравнения второго порядка с тремя регулярными особыми точками и двумя нерегулярными точками ранга 2. Решения радиального уравнения построены в явном виде, показана сходимость вовлеченных в них степенных рядов во всей физической области изменения переменной: от радиуса Шварцшильда до бесконечности. Результаты анализа процесса туннелирования существенно зависят от того, с какой стороны частицы падают на барьер: слева или справа от барьера. Математическая структура полученных асимптотических формул является точной, однако неизвестны аналитические выражения для сумм входящих в эти формулы степенных рядов. Эта часть исследования должна базироваться на численном суммировании рядов.

Ключевые слова: частица Дирака, черная дыра Шварцшильда, сингулярности, решения Фробениуса, туннелирование

Для цитирования: Овсиюк, Е. М. Решения Фробениуса и анализ туннельного эффекта для частицы со спином 1/2 в поле Шварцшильда / Е. М. Овсиюк, Я. А. Войнова, В. М. Редьков // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 3. – С. 274–280. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-3-274-280>

Elena M. Ovsyuk¹, Ya. A. Voynova², V. M. Red'kov³¹*Mozyr State Pedagogical University named after I. P. Shamyakin, Mozyr, Republic of Belarus*²*Minsk Suworov Military School, Minsk, Republic of Belarus*³*B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus***FROBENIUS' SOLUTIONS AND THE ANALYSIS OF THE TUNNELING EFFECT
FOR SPIN 1/2 PARTICLE THROUGH THE SCHWARZSCHILD BARRIER***(Communicated by Corresponding Member Lev M. Tomilchik)*

Abstract. For a Dirac particle, the general mathematical study of the particle tunneling process through an effective potential barrier generated by the Schwarzschild black hole background is done. The study is based on the use of 8 Frobenius' solutions of the related second-order differential equation with 3 regular and 2 irregular singularities of the rank 2. Solutions of the radial equations are constructed in explicit form, and the convergence of the involved power series is proved in the physical range of the variable $r \in (1, +\infty)$. Results for the tunneling effect are significantly different for two situations: one when the particle falls on the barrier from the inside and another when the particle falls from the outside. The mathematical structure of the derived asymptotic relations is exact, however the analytical expressions for the involved convergent powers series are unknown, and a further study of penetration and reflection coefficients should be based on the numerical summation of the power series.

Keywords: Dirac particle, Schwarzschild black hole, singularities, Frobenius solutions, tunneling effect

For citation: Ovsyuk E. M., Voynova Ya. A., Red'kov V. M. Frobenius' solutions and the analysis of the tunneling effect for spin 1/2 particle through the Schwarzschild barrier. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2018, vol. 62, no. 3, pp. 274–280 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-3-274-280>

Исходная идея, лежащая в основе данного анализа, появилась много лет назад в работе Редже и Уиллера [1]. Главным образом работа была посвящена выяснению условий стабильности черной дыры Шварцшильда [2]. Попутно в работе были получены линеаризованные уравнения для поля со спином 2 на фоне метрики Шварцшильда. Было установлено, что на фоне этой метрики уравнение для линеаризованного поля сводится к радиальному уравнению шрёдингеровского типа с эффективным потенциалом барьерного типа. Более детальный анализ этого и других вопросов был выполнен позднее Чандрасекаром [3]; см. также недавние работы [4; 5].

Для статической метрики Шварцшильда [2] в координатах $x^\alpha = (t, \theta, \phi, r)$

$$dS^2 = \Phi dt^2 - r^2 d\theta^2 - r^2 \sin^2 \theta d\phi^2 - \frac{1}{\Phi} dr^2, \quad \Phi = 1 - \frac{1}{r}, \quad r \in (1, +\infty)$$

общеквариантное уравнение Дирака [6] принимает следующий вид (удобно в волновой функции выделить специальный множитель):

$$\Psi = r^{-1} \Phi^{-1/4}(r) \psi, \quad \left[\frac{\gamma^0}{\sqrt{\Phi}} \partial_t + i\sqrt{\Phi} \gamma^3 \partial_r + \frac{1}{r} \left(i\gamma^1 \partial_\theta + \gamma^2 \frac{i\partial_\phi + i\sigma^{12} \cos \theta}{\sin \theta} \right) - M \right] \psi(x) = 0.$$

Решения со сферической симметрией строятся как собственные функции квадрата и третьей проекции оператора полного момента \vec{J}^2, J_3 , а также оператора пространственной инверсии (значения четности при заданном j равны $\Pi = \delta(-1)^{j+1}, \delta = \pm 1$), подстановка для волновой функции берется в виде [7]

$$\psi(x)_{\epsilon j m \delta} = e^{-i\epsilon t} \begin{vmatrix} f_1(r) D_{-1/2} \\ f_2(r) D_{+1/2} \\ \delta f_2(r) D_{-1/2} \\ \delta f_1(r) D_{+1/2} \end{vmatrix}.$$

Здесь используется формализм функций Вигнера (подробнее см. в [7]): $D_\sigma = D_{-m, \sigma}^j(\phi, \theta, 0)$; $j = 1/2, 3/2, \dots$; $m \in \{-j, \dots, +j\}$. После выполнения вычислений по разделению переменных для новых комбинаций радиальных функций (они используются для того, чтобы исключить из уравнений присутствие мнимой единицы i)

$$f = (f_1 + f_2), \quad g = -i(f_1 - f_2)$$

находим уравнения (используем обозначение $\nu = j + 1/2, \nu = 1, 2, 3, \dots$)

$$\left(\Phi \frac{d}{dr} + \frac{\nu \sqrt{\Phi}}{r} \right) f = -(\epsilon + M \sqrt{\Phi}) g, \quad \left(\Phi \frac{d}{dr} - \frac{\nu \sqrt{\Phi}}{r} \right) g = +(\epsilon - M \sqrt{\Phi}) f. \tag{1}$$

Введем новую переменную

$$+\sqrt{\Phi} = +\sqrt{1 - 1/r} = x, \quad r \rightarrow 1, \quad x \rightarrow 0, \quad r \rightarrow +\infty, \quad x \rightarrow +1,$$

физической областью изменения переменной является интервал $x \in (0, 1)$. Уравнения (1) принимают вид

$$\begin{aligned} \left(\frac{x(1-x^2)^2}{2} \frac{d}{dx} + \nu x(1-x^2) \right) f &= -(\epsilon - Mx) g, \\ \left(\frac{x(1-x^2)^2}{2} \frac{d}{dx} - \nu x(1-x^2) \right) g &= +(\epsilon + Mx) f. \end{aligned}$$

Отсюда следует уравнение 2-го порядка для функции $f(x)$ (отмечаем, что $c = \epsilon / M > 1$)

$$\left[\frac{d^2}{dx^2} + \left(\frac{1}{x} + \frac{2}{x+1} + \frac{2}{x-1} - \frac{1}{x+c} \right) \frac{d}{dx} - \nu \frac{2(1-3x^2)}{x(1-x^2)^2} - \frac{4\nu^2}{(1-x^2)^2} + \frac{1}{x+c} \frac{2\nu}{1-x^2} + (\epsilon^2 - M^2 x^2) \frac{4}{x^2(1-x^2)^4} \right] f = 0, \tag{2}$$

уравнение для функции $g(x)$ следует из (2) при формальных заменах:

$$f \Rightarrow g, \quad v \Rightarrow -v, \quad c \Rightarrow -c.$$

Исследуемая физическая задача становится понятнее [1], если преобразовать уравнения к другой радиальной переменной r_* :

$$\Phi \frac{d}{dr} = \frac{d}{dr_*}, \quad r_* = r + \ln(r-1), \quad r_* \in (-\infty, +\infty),$$

точкам $r = +1, +\infty$ соответствуют следующие значения r_* :

$$r \rightarrow +1, \quad r_* \rightarrow -\infty; \quad r \rightarrow +\infty, \quad r_* \rightarrow +\infty.$$

Система уравнений 1-го порядка (1) записывается так:

$$\left(\frac{d}{dr_*} + v\varphi(r_*) \right) f = -(\varepsilon + M\sqrt{\Phi})g, \quad \left(\frac{d}{dr_*} - v\varphi(r_*) \right) g = +(\varepsilon - M\sqrt{\Phi})f,$$

где вспомогательная функция $\varphi(r_*)$ задается соотношениями

$$\varphi(r_*) = \frac{\sqrt{\Phi}}{r}, \quad r_* \rightarrow \pm\infty, \quad \varphi(r_*) \rightarrow 0.$$

Соответственно, два уравнения 2-го порядка имеют вид

$$\begin{aligned} \left[(\varepsilon - M\sqrt{\Phi}) \left(\frac{d}{dr_*} + v\varphi \right) \frac{1}{(\varepsilon - M\sqrt{\Phi})} \right] \left(\frac{d}{dr_*} - v\varphi \right) g + (\varepsilon^2 - M^2\Phi)g &= 0, \\ \left[(\varepsilon + M\sqrt{\Phi}) \left(\frac{d}{dr_*} - v\varphi \right) \frac{1}{(\varepsilon + M\sqrt{\Phi})} \right] \left(\frac{d}{dr_*} + v\varphi \right) f + (\varepsilon^2 - M^2\Phi)f &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Уравнения (3) могут быть приведены к виду

$$\left(\frac{d^2}{dr_*^2} + P^2(r_*) \right) f = 0, \quad \left(\frac{d^2}{dr_*^2} + Q^2(r_*) \right) g = 0,$$

в физических особых точках $r \rightarrow 1, +\infty$ они упрощаются и имеют простые асимптотики:

$$r \rightarrow +1,$$

$$\left(\frac{d^2}{dr_*^2} + \varepsilon^2 \right) f = 0, \quad \left(\frac{d^2}{dr_*^2} + \varepsilon^2 \right) g = 0, \quad f, g \sim e^{\pm i\varepsilon r_*};$$

$$r \rightarrow \infty,$$

$$\left(\frac{d^2}{dr_*^2} + \varepsilon^2 - M^2 \right) f = 0, \quad \left(\frac{d^2}{dr_*^2} + \varepsilon^2 - M^2 \right) g = 0, \quad f, g \sim e^{\pm i\sqrt{\varepsilon^2 - M^2} r_*}.$$

Поведение кривых $P^2(r_*)$ и $Q^2(r_*)$ (они представляют квадраты эффективных радиальных импульсов) указывает на то, что здесь имеем ситуацию, когда возможно квантово-механическое туннелирование частиц сквозь эффективный потенциальный барьер [1; 3].

Обратимся к аналитическому исследованию туннельного эффекта. Для этого рассматриваем уравнение (2) для функции $f(x)$ в более удобном виде:

$$\begin{aligned} & \frac{d^2}{dx^2} f + \left(\frac{1}{x} + \frac{2}{x+1} + \frac{2}{x-1} - \frac{1}{x+c} \right) \frac{df}{dx} f + \\ & + \left\{ -\frac{2v}{x} + \frac{4\varepsilon^2}{x^2} + \frac{D}{x+c} + \frac{A}{(x+1)} + \frac{A'}{(x-1)} + \frac{B}{(x+1)^2} + \frac{B'}{(x-1)^2} + \right. \\ & \left. + \frac{\varepsilon^2 - M^2/2}{(x+1)^3} - \frac{\varepsilon^2 - M^2/2}{(x-1)^3} + \frac{\varepsilon^2 - M^2}{4(x+1)^4} + \frac{\varepsilon^2 - M^2}{4(x-1)^4} \right\} f = 0, \end{aligned} \quad (4)$$

где

$$A = \frac{-8v^2 + 35\varepsilon^2 + 8v - 5M^2 + 8v/(c-1)}{8}, \quad A' = \frac{+8v^2 - 35\varepsilon^2 + 8v + 5M^2 - 8v/(c+1)}{8},$$

$$B = \frac{-8v^2 + 19\varepsilon^2 - 8v - 5M^2}{8}, \quad B' = \frac{-8v^2 + 19\varepsilon^2 + 8v - 5M^2}{8} \frac{x-\mu}{\sigma}, \quad D = -\frac{2v}{c^2-1}.$$

Здесь имеем уравнение с тремя регулярными особыми точками $x = 0, -c, \infty$ и двумя нерегулярными особыми точками ранга 2 (см. [8; 9]). Приведем асимптотики решений около всех особых точек:

$$x \rightarrow 0, \quad f \sim x^\gamma, \quad \gamma = \pm 2i\varepsilon; \tag{5a}$$

$$x \rightarrow -c, \quad f = (x+c)^\rho, \quad \rho = 0, 2; \tag{5b}$$

$$x \rightarrow \infty (y = x^{-1}), \quad \frac{d^2 f}{dy^2} - \frac{2}{y} \frac{df}{dy} = 0, \quad f(y) \sim \frac{1}{x^\sigma}, \quad \sigma = 0, 3; \tag{5c}$$

около точки $x = +1$:

$$f = (x-1)^\alpha \exp\left(\frac{\beta}{x-1}\right), \quad \beta = \pm i \frac{\sqrt{\varepsilon^2 - M^2}}{2}, \quad \alpha = \pm i \frac{(\varepsilon^2 - M^2) + M^2/2}{\sqrt{\varepsilon^2 - M^2}}; \tag{5d}$$

около точки $x = -1$:

$$f = (x+1)^{\alpha'} \exp\left(\frac{\beta'}{x+1}\right), \quad \beta' = \pm i \frac{\sqrt{\varepsilon^2 - M^2}}{2}, \quad \alpha' = \mp i \frac{(\varepsilon^2 - M^2) + M^2/2}{\sqrt{\varepsilon^2 - M^2}}. \tag{5e}$$

Построим формально точные решения Фробениуса [8; 9] рассматриваемого уравнения (4). Введем сокращающие запись обозначения

$$(\varepsilon^2 - M^2)/4 = E, \quad \varepsilon^2 - M^2/2 = E',$$

для дальнейшего уравнения (4) достаточно будет представить в кратком виде

$$\frac{d^2}{dx^2} f + \left(\frac{1}{x} + \frac{2}{x+1} + \frac{2}{x-1} - \frac{1}{x+c} \right) \frac{df}{dx} +$$

$$+ \left[-\frac{2v}{x} + \frac{4\varepsilon^2}{x^2} + \frac{D}{x+c} + \frac{A}{(x+1)} + \frac{A'}{(x-1)} + \right.$$

$$\left. + \frac{B}{(x+1)^2} + \frac{B'}{(x-1)^2} + \frac{E'}{(x+1)^3} - \frac{E'}{(x-1)^3} + \frac{E}{(x+1)^4} + \frac{E}{(x-1)^4} \right] f = 0.$$

Решения фробениусовского типа строим на основе подстановки

$$f(x) = x^\gamma (x-1)^\alpha \exp\left(\frac{\beta}{x-1}\right) (x+1)^{\alpha'} \exp\left(\frac{\beta'}{x+1}\right) F(x).$$

Накладывая уже известные ограничения на параметры (см. (5a)–(5e)), находим уравнение для функции $F(x)$. Приводим его краткую запись, достаточную для последующих вычислений,

$$F'' + \left(\frac{n}{x} + \frac{n_1}{x-1} + \frac{n_2}{(x-1)^2} + \frac{n_3}{x+1} + \frac{n_4}{(x+1)^2} + \frac{n_5}{x+c} \right) F' +$$

$$+ \left(\frac{m}{x} + \frac{m_1}{x-1} + \frac{m_2}{(x-1)^2} + \frac{m_3}{x+1} + \frac{m_4}{(x+1)^2} + \frac{m_5}{x+c} \right) F = 0.$$

Его решения строятся в виде степенных рядов с 7-членными рекуррентными соотношениями

$$F = \sum_{n=0}^{\infty} b_n x^n.$$

Действуя по методу Пуанкаре–Перрона [8; 9], получаем алгебраическое уравнение, корни R которого позволяют найти возможные радиусы сходимости ряда:

$$R = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{b_n}{b_{n-1}}, \quad R_{\text{conv}} = \frac{1}{|R|}, \quad (1 + cR)R(R^2 - 1)^2 = 0;$$

корни равны $R = 0$, $R = \pm 1$, $R = -c^{-1}$; следовательно, возможны радиусы сходимости $R_{\text{conv}} = 1$, $c > 1$, ∞ . Минимальный радиус сходимости $R_{\text{conv}} = 1$ покрывает всю физическую область изменения переменной $x \in (0, 1)$, $r \in (1, \infty)$.

Теперь обратимся собственно к описанию туннельного эффекта на барьере Шварцшильда. Исходя из общей структуры решений Фробениуса

$$f(x) = x^\gamma (x-1)^\alpha \exp\left(\frac{\beta}{x-1}\right) (x+1)^{\alpha'} \exp\left(\frac{\beta'}{x+1}\right) F(x),$$

$$\beta = \pm i\Gamma, \quad \alpha = \pm i\Sigma, \quad \Gamma = \frac{\sqrt{\varepsilon^2 - M^2}}{2}, \quad \Sigma = \frac{\varepsilon^2 - M^2 / 2}{\sqrt{\varepsilon^2 - M^2}},$$

$$\beta' = \pm i\Gamma, \quad \alpha' = \pm i\Sigma, \quad \Gamma = \frac{\sqrt{\varepsilon^2 - M^2}}{2}, \quad \Sigma = \frac{\varepsilon^2 - M^2 / 2}{\sqrt{\varepsilon^2 - M^2}},$$

$$\gamma = \pm 2i\varepsilon,$$

можем построить 8 решений (разбиваем их в две группы по 4 и в пары сопряженных друг другу):

$$g_1(x) = e^{+2i\varepsilon \ln x} e^{+i\Sigma \ln(x-1)} e^{\frac{+i\Gamma}{x-1}} e^{-i\Sigma \ln(x+1)} e^{\frac{+i\Gamma}{x+1}} (R_1(x) + iI_1(x)),$$

$$g_2(x) = e^{-2i\varepsilon \ln x} e^{-i\Sigma \ln(x-1)} e^{\frac{-i\Gamma}{x-1}} e^{+i\Sigma \ln(x+1)} e^{\frac{-i\Gamma}{x+1}} (R_1(x) - iI_1(x));$$

$$g_3(x) = e^{+2i\varepsilon \ln x} e^{-i\Sigma \ln(x-1)} e^{\frac{-i\Gamma}{x-1}} e^{+i\Sigma \ln(x+1)} e^{\frac{-i\Gamma}{x+1}} (R_3(x) + iI_3(x)),$$

$$g_4(x) = e^{-2i\varepsilon \ln x} e^{+i\Sigma \ln(x-1)} e^{\frac{+i\Gamma}{x-1}} e^{-i\Sigma \ln(x+1)} e^{\frac{+i\Gamma}{x+1}} (R_3(x) - iI_3(x));$$

$$g_5(x) = e^{+2i\varepsilon \ln x} e^{+i\Sigma \ln(x-1)} e^{\frac{+i\Gamma}{x-1}} e^{+i\Sigma \ln(x+1)} e^{\frac{-i\Gamma}{x+1}} (R_5(x) + iI_5(x)),$$

$$g_6(x) = e^{-2i\varepsilon \ln x} e^{-i\Sigma \ln(x-1)} e^{\frac{-i\Gamma/2}{x-1}} e^{-i\Sigma \ln(x+1)} e^{\frac{+i\Gamma/2}{x+1}} (R_5(x) - iI_5(x));$$

$$g_7(x) = e^{+2i\varepsilon \ln x} e^{-i\Sigma \ln(x-1)} e^{\frac{-i\Gamma/2}{x-1}} e^{-i\Sigma \ln(x+1)} e^{\frac{+i\Gamma/2}{x+1}} (R_7(x) + iI_7(x)),$$

$$g_8(x) = e^{-2i\varepsilon \ln x} e^{+i\Sigma \ln(x-1)} e^{\frac{+i\Gamma}{x-1}} e^{+i\Sigma \ln(x+1)} e^{\frac{-i\Gamma}{x+1}} (R_7(x) - iI_7(x)).$$

Отметим, что в многозначной функции используем только одну ветвь с $n = 0$:

$$e^{\pm i\Sigma \ln(x-1)} = e^{\pm i\Sigma [\ln|x-1| + i(\pi + 2\pi n)]} = e^{\mp \Sigma(\pi + 2\pi n)} e^{\pm i\Sigma \ln|x-1|}.$$

Символами $R(x)$, $I(x)$ в (6a) и (6b) обозначены вещественная и мнимая части сходящихся рядов, эти функции зависят от значений квантовых чисел ε , $\nu = j + 1/2$.

Найдем асимптотическое поведение решений g_1 , g_3 и g_2 , g_4 (помня о суммах сходящихся рядов):

$$x \rightarrow 0 \quad (r_* \rightarrow -\infty),$$

$$g_1 = e^{-\Sigma\pi} e^{+i\varepsilon r_*}, \quad g_2 = e^{+\Sigma\pi} e^{-i\varepsilon r_*},$$

$$g_3 = e^{+\Sigma\pi} e^{+i\Sigma r_*}, \quad g_4 = e^{-\Sigma\pi} e^{-i\varepsilon r_*};$$

$$x \rightarrow +1 \quad (r_* \rightarrow +\infty),$$

$$g_1 = [e^{-i\Sigma \ln 2} e^{+i\Gamma/2} (R_1 + iI_1)] e^{-i2\Gamma r_*}, \quad g_2 = [e^{+i\Sigma \ln 2} e^{-i\Gamma/2} (R_1 - iI_1)] e^{+i2\Gamma r_*},$$

$$g_3 = [e^{+i\Sigma \ln 2} e^{-i\Gamma/2} (R_3 + iI_3)] e^{+i2\Gamma r_*}, \quad g_4 = [e^{-i\Sigma \ln 2} e^{+i\Gamma/2} (R_3 - iI_3)] e^{-i2\Gamma r_*}.$$

Комбинируем эти функции так:

$$H_+ = \frac{g_3 + g_1}{2}, \quad H_- = \frac{g_3 - g_1}{2}, \quad F_+ = \frac{g_2 + g_4}{2}, \quad F_- = \frac{g_2 - g_4}{2};$$

их поведение слева ($r_* \rightarrow -\infty$) задается соотношениями

$$H_+ = \cosh \Sigma \pi e^{+i\epsilon r_*}, \quad H_- = \sinh \Sigma \pi e^{+i\epsilon r_*}, \\ F_+ = \cosh \Sigma \pi e^{-i\epsilon r_*}, \quad F_- = \sinh \Sigma \pi e^{-i\epsilon r_*};$$

поведение справа ($r_* \rightarrow +\infty$) такое:

$$H_{\pm} = \frac{1}{2} [e^{+i\Sigma \ln 2} e^{-i\Gamma/2} (R_3 + iI_3)] e^{+i2\Gamma r_*} \pm \frac{1}{2} [e^{-i\Sigma \ln 2} e^{+i\Gamma/2} (R_1 + iI_1)] e^{-i2\Gamma r_*}, \\ F_{\pm} = \frac{1}{2} [e^{+i\Sigma \ln 2} e^{-i\Gamma/2} (R_1 - iI_1)] e^{+i2\Gamma r_*} \pm \frac{1}{2} [e^{-i\Sigma \ln 2} e^{+i\Gamma/2} (R_3 - iI_3)] e^{-i2\Gamma r_*}.$$

Наибольший интерес представляют решения F_+ и F_- :

$$F_+, \quad \cosh \Sigma \pi e^{-i2\Gamma r_*} <---> A^* e^{-i2\Gamma r_*} + B^* e^{+i2\Gamma r_*}, \\ F_-, \quad \sinh \Sigma \pi e^{-i2\Gamma r_*} <---> A^* e^{-i2\Gamma r_*} - B^* e^{+i2\Gamma r_*};$$

они описывают ситуацию, когда частица падает справа на гравитационный барьер, при этом частично отражаясь и частично проходя сквозь него. Физическая информация об эффекте туннелирования в процессе

$$\frac{C_{\pm}}{A^*} e^{-i\epsilon r_*} <----> e^{-i2\Gamma r_*} \pm \frac{B^*}{A^*} e^{+i2\Gamma r_*}$$

содержится в коэффициентах отражения R и прохождения D :

$$D = \left| \frac{C_{\pm}}{A^*} \right|^2, \quad R = 1 - D = \left| \frac{B^*}{A^*} \right|^2.$$

Аналогично, можем использовать решения g_5, \dots, g_8 , их асимптотики задаются соотношениями

$$g_5 = e^{+i\Sigma \ln 2} e^{-i\Gamma/2} (R_5 + iI_5) e^{-i2\Gamma r_*}, \quad g_8 = e^{+i\Sigma \ln 2} e^{-i\Gamma/2} (R_7 - iI_7) e^{-i\epsilon r_*}, \\ x \rightarrow 0, \quad g_5 = e^{-\Sigma \pi} e^{i\epsilon r_*}, \quad g_8 = e^{+\Sigma \pi} e^{-i2\Gamma r_*}; \\ g_6 = e^{-i\Sigma \ln 2} e^{+i\Gamma/2} (R_5 - iI_5) e^{+i2\Gamma r_*}, \quad g_7 = e^{-i\Sigma \ln 2} e^{+i\Gamma/2} (R_7 + iI_7) e^{+i2\Gamma r_*}, \\ x \rightarrow 1, \quad g_6 = e^{+\Sigma \pi} e^{-i2\Gamma r_*}, \quad g_7 = e^{-\Sigma \pi} e^{+i2\Gamma r_*}.$$

Введем комбинации из этих функций

$$\bar{H}_{\pm} = g_5 \pm g_8, \quad \bar{F}_{\pm} = g_6 \pm g_7;$$

наиболее интересными являются функции \bar{F}_+ и \bar{F}_- со следующим асимптотическим поведением:

$$\bar{F}_{\pm} : e^{-\Sigma \pi} e^{+i\epsilon r_*} \pm e^{+\Sigma \pi} e^{-i\epsilon r_*} <---> e^{+i\Sigma \ln 2} e^{-i\Gamma/2} [(R_5 - iI_5) \pm (R_7 + iI_7)] e^{+i2\Gamma r_*}.$$

Они описывают ситуацию, когда частица падает на барьер слева, частично отражаясь от него и проходя сквозь него. Соответствующие коэффициенты отражения \bar{R} и прохождения \bar{D} задаются равенствами

$$\bar{A} e^{+i\epsilon r_*} \pm \bar{B} e^{-i\epsilon r_*} ---> \bar{C}_{\pm} e^{+i2\Gamma r_*}, \quad \bar{D} = \left| \frac{\bar{C}_{\pm}}{\bar{A}} \right|^2, \quad \bar{R} = \left| \frac{\bar{B}}{\bar{A}} \right|^2.$$

Отмечаем, что согласно развитой методике, результаты анализа процесса туннелирования существенно зависят от того, с какой стороны частицы двигаются к барьеру: слева или справа. Математическая структура полученных асимптотических формул является точной, однако неизвестны аналитические выражения для сумм входящих в эти формулы степенных рядов. Эта часть исследования должна базироваться на численном суммировании рядов.

Список использованных источников

1. Regge, T. Stability of a Schwarzschild Singularity / T. Regge, J. A. Wheeler // *Physical Review*. – 1957. – Vol. 108, N 4. – P. 1063–1069. <https://doi.org/10.1103/physrev.108.1063>
2. Schwarzschild, K. Über das Gravitationsfeld eines Massenpunktes nach der Einsteinschen Theorie / K. Schwarzschild // *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften*. – Sitzung vom 3. Februar 1916. – S. 189–196.
3. Chandrasekhar, S. *The Mathematical Theory of Black Holes* / S. Chandrasekhar // *General Relativity and Gravitation*. – Oxford: Oxford University Press, 1983. – 646 p.
4. Smoller, J. Asymptotic Behavior of Massless Dirac Waves in Schwarzschild Geometry / J. Smoller, Chunjing Xie // *Annales Henri Poincaré*. – 2012. – Vol. 13, N 4. – P. 943–989. <https://doi.org/10.1007/s00023-011-0145-9>
5. To Analysis of the Dirac and Majorana Particle Solutions in Schwarzschild Field / E. M. Ovsyuk [et al.] // *Nonlinear Phenomena in Complex System*. – 2017. – Vol. 20, N 1. – P. 56–72.
6. Редьков, В. М. Поля частиц в римановом пространстве и группа Лоренца / В. М. Редьков. – Минск: Белорусская наука, 2009. – 486 с.
7. Редьков, В. М. Тетрадный формализм, сферическая симметрия и базис Шредингера / В. М. Редьков. – Минск: Белорусская наука, 2011. – 339 с.
8. Ronveaux, A. *Heun's Differential Equations* / A. Ronveaux. – Oxford: Oxford Univ. Press, 1995. – 354 p.
9. Slavyanov, S. Yu. *Special functions. A unified theory based on singularities* / S. Yu. Slavyanov, W. Lay. – Oxford: Oxford Univ. Press, 2000. – 312 p.

References

1. Regge T., Wheeler J. A. Stability of a Schwarzschild Singularity. *Physical Review*, 1957, vol. 108, no. 4, pp. 1063–1069. <https://doi.org/10.1103/physrev.108.1063>
2. Schwarzschild K. Über das Gravitationsfeld eines Massenpunktes nach der Einsteinschen Theorie. *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften. Sitzung vom 3. Februar 1916*. pp. 189–196 (in German).
3. Chandrasekhar S. *The Mathematical Theory of Black Holes*. Oxford, Oxford University Press, 1983. 646 p.
4. Smoller J., Xie Chunjing. Asymptotic Behavior of Massless Dirac Waves in Schwarzschild Geometry. *Annales Henri Poincaré*, 2012, vol. 13, no. 4, pp. 943–989. <https://doi.org/10.1007/s00023-011-0145-9>
5. Ovsyuk E. M., Veko O. V., Rusak Yu. A., Chichurin A. V., Red'kov V. M. To Analysis of the Dirac and Majorana Particle Solutions in Schwarzschild Field. *Nonlinear Phenomena in Complex System*, 2017, vol. 20, no 1, pp. 56–72.
6. Red'kov V. M. *Field particles in Riemannian space and the Lorentz group*. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ., 2009. 496 p. (in Russian).
7. Red'kov V. M. *Tetrad formalism, spherical symmetry and Schrödinger basis*. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ., 2011. 496 p. (in Russian).
8. Ronveaux A. *Heun's Differential Equations*. Oxford, Oxford University Press, 1995. 354 p.
9. Slavyanov S. Yu., Lay W. *Special functions. A unified theory based on singularities*. Oxford, Oxford University Press, 2000. 312 p.

Информация об авторах

Овсюк Елена Михайловна – канд. физ.-мат. наук, доцент. Мозырский государственный педагогический университет им. И. П. Шамякина (ул. Студенческая, 28, 247760, Мозырь, Гомельская обл., Республика Беларусь). E-mail: e.ovsiyuk@mail.ru.

Войнова Янина Александровна – учитель. Минское суворовское военное училище (ул. М. Богдановича, 29, 220029, Минск, Республика Беларусь). E-mail: voynuschka@mail.ru.

Редьков Виктор Михайлович – д-р физ.-мат. наук, гл. науч. сотрудник. Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси (пр. Независимости, 68-2, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: redkov@dragon.bas-net.by.

Information about the authors

Ovsyuk Elena Mikhailovna – Ph. D. (Physics and Mathematics), Assistant Professor. Mozyr State Pedagogical University named after I. P. Shamyakin (28, Studencheskaya Str., 247760, Mozyr, Republic of Belarus). E-mail: e.ovsiyuk@mail.ru.

Voynova Yanina Aleksandrovna – Physics teacher. Minsk Suvorov Military School (29, Bogdanovich Str., 220029, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: voynuschka@mail.ru.

Red'kov Viktor Mikhailovich – D. Sc. (Physics and Mathematics), Chief Researcher. B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (68-2, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: redkov@dragon.bas-net.by.

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

ХИМИЯ
CHEMISTRY

УДК 547:577:616-006
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-3-281-292>

Поступило в редакцию 12.03.2018
Received 12.03.2018

**А. М. Андрианов¹, Г. И. Николаев², И. А. Кашин², Ю. В. Корноушенко¹,
член-корреспондент С. А. Усанов¹**

¹*Институт биоорганической химии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь*
²*Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь*

**КОМПЬЮТЕРНЫЙ ДИЗАЙН ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ИНГИБИТОРОВ АРОМАТАЗЫ
НА ОСНОВЕ ПРОИЗВОДНЫХ 1,2,4-ТРИАЗОЛА**

Аннотация. Методами молекулярного моделирования осуществлен компьютерный дизайн высокоаффинных ингибиторов ароматазы на основе производных 1,2,4-триазола. С помощью молекулярного докинга и квантовой химии проведена оценка потенциальной биологической активности сконструированных соединений. В результате идентифицированы шесть соединений-лидеров, которые образуют координационную связь с атомом железа гема фермента и эффективно взаимодействуют с его субстрат-связывающим сайтом. Выполнен анализ межмолекулярных взаимодействий, реализующихся в структурных комплексах этих лигандов с ароматазой, и рассчитаны энтальпии их образования. На основе полученных данных предсказано, что идентифицированные соединения формируют перспективные базовые структуры для разработки новых эффективных лекарственных препаратов для терапии рака молочной железы.

Ключевые слова: ароматаза, компьютерное конструирование лекарств, молекулярный докинг, квантовая химия, ингибиторы ароматазы, рак молочной железы

Для цитирования: Компьютерный дизайн потенциальных ингибиторов ароматазы на основе производных 1,2,4-триазола / А. М. Андрианов [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 3. – С. 281–292. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-3-281-292>

**Alexander M. Andrianov¹, Gregory I. Nikolaev², Ivan A. Kashyn², Yuri V. Kornoushenko¹,
Corresponding Member Sergei A. Usanov¹**

¹*Institute of Bioorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*
²*United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

**COMPUTER-AIDED DESIGN OF POTENTIAL AROMATASE INHIBITORS
BASED ON 1,2,4-TRIAZOLE DERIVATIVES**

Abstract. Computer-aided design of the high-affinity inhibitors of aromatase based on 1,2,4-triazole derivatives was performed by molecular modeling tools. The potential biological activity of the designed compounds was evaluated by molecular docking and quantum chemistry calculations. As a result, six hits that form a coordinate bond with an iron atom of an enzyme hem and effectively interact with its substrate-binding site were identified. The intermolecular interactions appearing in the structural complexes of these ligands with aromatase were analyzed and the enthalpies of their formation were calculated. Based on the data obtained, the identified compounds were suggested to present good scaffolds for the development of novel effective drugs against breast cancer.

Keywords: aromatase, computer-aided drug design, molecular docking, quantum chemistry, aromatase inhibitors, breast cancer

For citation: Andrianov A. M., Nikolaev G. I., Kashyn I. A., Kornoushenko Yu. V., Usanov S. A. Computer-aided design of potential aromatase inhibitors based on 1,2,4-triazole derivatives. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2018, vol. 62, no. 3, pp. 281–292 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-3-281-292>

Введение. У женщин в период фертильной фазы синтез эстрогенов происходит преимущественно в яичниках. Однако в постменопаузе, на долю которой приходится около трети случаев развития рака молочной железы (РМЖ), интенсивность их синтеза в яичниках снижается, и эстрогены синтезируются в периферической ткани с помощью ферментного комплекса ароматазы, состоящего из гем-содержащего белка цитохрома P450 и флавопротеина – NADPH-цитохром P450 редуктазы [1; 2]. Ароматаза (CYP19A1) катализирует реакцию превращения андрогенов в эстрогены и проявляет биологическую активность как в периферических тканях, так и в опухолевой ткани молочной железы, обеспечивая высокий уровень концентрации эстрогенов [1; 2]. В эстроген-зависимых злокачественных новообразованиях эстрогены выступают в роли факторов роста и развития опухоли. Поэтому ингибирование ароматазы приводит к снижению уровня эстрогенов в организме и предотвращению роста раковых клеток.

В большинстве случаев РМЖ является гормон-зависимым. Эндокринная терапия РМЖ направлена на устранение воздействия на опухоль эстрогенов, и ее эффективность зависит от экспрессии рецепторов эстрогенов и рецепторов прогестерона клетками опухоли. Селективные модуляторы рецепторов эстрогенов блокируют связывание эстрогенов с их рецепторами [1; 2]. Однако они могут действовать как частичные агонисты или оказывать эстрогенное действие в других тканях, что приводит к увеличению риска развития рака эндометрия, катаракты, тромбозов, инсультов и бесплодия. В качестве альтернативной стратегии лечения РМЖ применяют ингибиторы ароматазы (ИА), которые не обладают эстрогенными эффектами и вызывают меньше побочных эффектов [1; 2]. Механизм реакции, катализируемой ароматазой, заключается в трех последовательных гидроксировании C-19 метильной группы андрогенов, в результате которых происходит отщепление формиата и ароматизация А-цикла стероида [2]. Ингибиторы ароматазы препятствуют реакции ароматизации, которая превращает надпочечниковые андрогены в эстрогены. ИА, подавляя синтез и, как следствие, снижая уровень эстрогенов, препятствуют развитию РМЖ [3–5]. Среди лекарственных препаратов, применяемых для терапии гормон-зависимого РМЖ, выделяют три поколения ИА [5]. Недостатком представителей первых двух поколений (аминоглутетимид, фадрозол, форместан) является недостаточная селективность действия: кроме ароматазы, они ингибируют ряд других ферментов. ИА третьего поколения, используемые в настоящее время для терапии ранних и развитых стадий РМЖ у женщин в постменопаузе, характеризуются большей специфичностью и эффективностью. Эти ингибиторы представлены лекарственными препаратами двух классов [2]: 1) стероидным ингибитором экземестаном и 2) обратимыми нестероидными ингибиторами ворозолом, анастрозолом и летрозолом. Стероидные препараты и, в частности, экземестан превращаются ароматазой в соединения, которые необратимо связываются с активным участком фермента, полностью нарушая его активность как биокатализатора [2]. После прекращения воздействия таких ингибиторов требуется значительное время для того, чтобы фермент синтезировался в тканях вновь. Обратимые нестероидные ИА ворозол, летрозол и анастрозол представляют собой триазольные соединения, которые связываются с активным каталитическим центром ароматазы путем координации атома железа гема CYP19A1 через неподеленную электронную пару атома азота 1,2,4-триазола [3–5].

Несмотря на то что нестероидные ИА третьего поколения летрозол и анастрозол широко используются в клинической практике для лечения гормон-зависимого РМЖ, эти соединения все же обладают рядом побочных эффектов, приводящих к торможению мышечного роста, артралгии, снижению прочности костей, нарушению липидного профиля крови, падению либидо и ухудшению общего состояния [5]. В связи с этим актуальным является поиск новых ингибиторов ароматазы, обладающих меньшей токсичностью и снижающих риск возможного возникновения резистентности к используемым препаратам, связанной с их длительным применением.

В последнее десятилетие постоянно возрастающую роль в процессе создания новых лекарственных препаратов играют методы компьютерного молекулярного моделирования, которые позволяют значительно сократить сроки разработки лекарств и существенно уменьшить финансовые расходы. До недавнего времени в связи с отсутствием информации о трехмерной структуре ароматазы новые ингибиторы CYP19A1 разрабатывались с привлечением непрямых методов компьютерного конструирования лекарств, базирующихся на анализе известных лигандов

к ферменту и последующем выявлении их общих структурных свойств, которые обуславливают биологическую активность [6–8]. Определение методом рентгеноструктурного анализа пространственной структуры ароматазы высокого разрешения [2; 9] создало предпосылки не только для понимания функции и механизма действия фермента, но и для разработки новых эффективных ингибиторов СYP19A1 на основе прямых методов компьютерного конструирования лекарств, использующих данные о структуре молекулярной мишени (см., напр., [10–12]).

Компьютерный дизайн новых структур биологически активных молекул может быть осуществлен с помощью виртуального скрининга баз данных химических соединений, позволяющего найти молекулы с требуемой биологической активностью, величина которой, однако, как правило, оказывается низкой. Тем не менее, идентифицированные в результате виртуального скрининга соединения могут быть использованы в качестве базовых структур для их дальнейшей оптимизации, направленной на получение молекул с большей биологической активностью и улучшенными фармакокинетическими свойствами. Кроме того, эти соединения формируют исходные структурные блоки для реализации молекулярного *de novo* дизайна в рамках концепции клик-химии, представляющей набор модульных реакций, которые протекают с высоким выходом в физиологических условиях, стереоспецифичны и дают безопасные побочные продукты [13]. Преимущества такого подхода заключаются в том, что его использование позволяет значительно упростить массовый параллельный синтез кандидатов и ускорить процесс создания новых, эффективных и безопасных лекарственных препаратов.

Цель исследования – осуществить компьютерный дизайн высокоаффинных и селективных ингибиторов ароматазы и идентифицировать соединения, перспективные для разработки новых эффективных лекарственных препаратов для терапии РМЖ.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие задачи:

1. Формирование библиотек низкомолекулярных соединений, содержащих структурные блоки для сборки гибридных молекул.
2. Компьютерный дизайн структур-кандидатов потенциальных ингибиторов ароматазы.
3. Отбор молекул, удовлетворяющих «правилу пяти» Липинского, накладывающему на лиганд, взаимодействующий с заданной молекулярной мишенью, условия подобия лекарству [14].
4. Построение структурных комплексов сконструированных гибридных молекул с молекулярной мишенью.
5. Энергетическая оптимизация структурных комплексов и идентификация соединений с низкой энергией межмолекулярных взаимодействий.

В результате проведенных исследований идентифицированы соединения, способные к эффективному и специфическому взаимодействию с субстрат-связывающим сайтом ароматазы, которые опосредуются образованием координационной связи с атомом железа гема СYP19A1.

Материалы и методы исследования. Решение поставленных задач выполнено в рамках комплексного подхода, предусматривающего реализацию следующих этапов:

- 1) идентификация в базе данных химических соединений ZINC (<http://zinc.docking.org>) исходных структурных блоков для получения гибридных молекул, содержащих элементы структуры, способные обеспечить селективность и эффективность их связывания с активным каталитическим центром СYP19A1;
- 2) конструирование потенциальных лигандов ароматазы;
- 3) молекулярный докинг сконструированных соединений с молекулой-мишенью;
- 4) оптимизация построенных структурных комплексов методами квантовой химии с последующим расчетом энергии межмолекулярных взаимодействий и отбором лигандов, перспективных для синтеза и тестирования на биологическую активность.

На первом этапе с помощью программы DataWarrior (<http://www.openmolecules.org/help/basics.html>) были созданы две молекулярные библиотеки. Первая библиотека (библиотека 1) включала отобранные из кластера «Drug-Like» базы данных ZINC малые молекулы с молекулярной массой <250 Да, содержащие 1,2,4-триазол – элемент структуры, способный обеспечить образование координационной связи с атомом железа гема ароматазы. Во вторую библиотеку (библиотека 2) были отобраны низкомолекулярные соединения (молекулярная масса <250 Да) с функциональ-

ными группами, которые необходимы для моделирования реакций, реализованных в программном пакете AutoClickChem (<http://sourceforge.net/projects/autoclickchem/>). В результате работы программы DataWarrior библиотека 1 включала 1519 соединений, а библиотека 2 – 170. На следующем этапе соединения из сформированных библиотек были использованы в качестве реагентов для сборки конъюгатов 1,2,4-триазола с помощью программы AutoClickChem. При этом для моделирования реакций между соединениями из библиотек 1 и 2 программа AutoClickChem использовала все пары их функциональных групп, быстро и специфически реагирующих между собой. Это позволило получить набор из 4576 гибридных молекул, в котором 784 соединения удовлетворяли «правилу пяти» Липинского [14] согласно данным программы DruLiTo (niper.gov.in/pi_dev_tools/DruLiToWeb/DruLiTo_index.html).

Структурные комплексы этих 784 соединений с ароматазой моделировали методом молекулярного докинга, который позволяет предсказать наиболее вероятные ориентации лиганда в активном центре белка. В качестве контрольного соединения использовали ИА летрозол, трехмерную структуру которого заимствовали из базы данных DrugBank (код DB01006, <https://www.drugbank.ca>). Молекулярный докинг выполняли в программном пакете QuickVina 2 (<http://omictools.com/quickvina-tool>) с учетом конформационной подвижности лиганда. Трехмерную структуру ароматазы заимствовали из ее комплекса с андростендионом в кристалле (код 3EQM в Международном банке белков; <http://www.rcsb.org/pdb/>) [2; 9]. Перед проведением докинга с помощью программы OpenBabel (http://openbabel.org/wiki/Main_Page) к структурам ароматазы и лигандов добавляли атомы водорода и проводили оптимизацию их геометрических параметров в силовом поле UFF. Ячейка для докинга представляла собой фрагмент СУР19А1 с координатами $x \in (75 \text{ \AA}; 95 \text{ \AA})$, $y \in (42 \text{ \AA}; 62 \text{ \AA})$, $z \in (34 \text{ \AA}; 54 \text{ \AA})$, включающий субстрат-связывающую полость ароматазы; т. е. объем ячейки составлял $20 \times 20 \times 20 = 8000 \text{ \AA}^3$. Для каждого лиганда генерировали 9 моделей комплекса, лучших по значению оценочной функции; при этом параметр, характеризующий полноту поиска (охват конформационного пространства), был задан равным 50. В результате анализа данных молекулярного докинга были отобраны 100 лучших по значению оценочной функции комплексов сконструированных лигандов с ароматазой, а также ее комплекс с летрозолом. Геометрические параметры этих комплексов оптимизировали методами квантовой химии.

Квантово-химические расчеты выполняли полуэмпирическим методом PM7 в программном пакете MOPAC2016 (<http://openmopac.net/MOPAC2016.html>) с неявной моделью растворителя в рамках приближения COSMO (COnductor-like Screening MOdel) при значении диэлектрической проницаемости, равном 78,4 (<http://openmopac.net/MOPAC2016.html>). При подготовке к оптимизации в структурах комплексов лиганд/белок, построенных с помощью молекулярного докинга, восстанавливали атомы водорода и оптимизировали их геометрию в силовом поле UFF. Для этих целей применяли программу Open Babel (http://openbabel.org/wiki/Main_Page). Для ускорения вычислений использовали метод локализованных орбиталей. Градиент энергии, при котором завершается процесс оптимизации, задавали равным 50 ккал/моль/\AA (<http://openmopac.net/MOPAC2016.html>).

Межмолекулярные водородные связи, солевые мостики и π - π -взаимодействия в оптимизированных комплексах лигандов с ароматазой определяли с помощью программы BINANA (<http://nbcg.ucsd.edu/data/sw/hosted/binana/>). Для идентификации ван-дер-ваальсовых взаимодействий использовали программный пакет LigPlot (<http://ebi.ac.uk/thornton-srv/software/LIGPLOT/>).

Оценку энергии межмолекулярных взаимодействий для комплексов, полученных в результате квантово-химической оптимизации, проводили на основе анализа энергий молекул в свободном состоянии и комплекса, образующегося в ходе реакции



где $[A]$ и $[B]$ – молекулы A и B в свободном состоянии; $[A*B*]$ – комплекс, образующийся в результате взаимодействия молекул A и B с учетом структурных перестроек в молекулах (A^* и B^*).

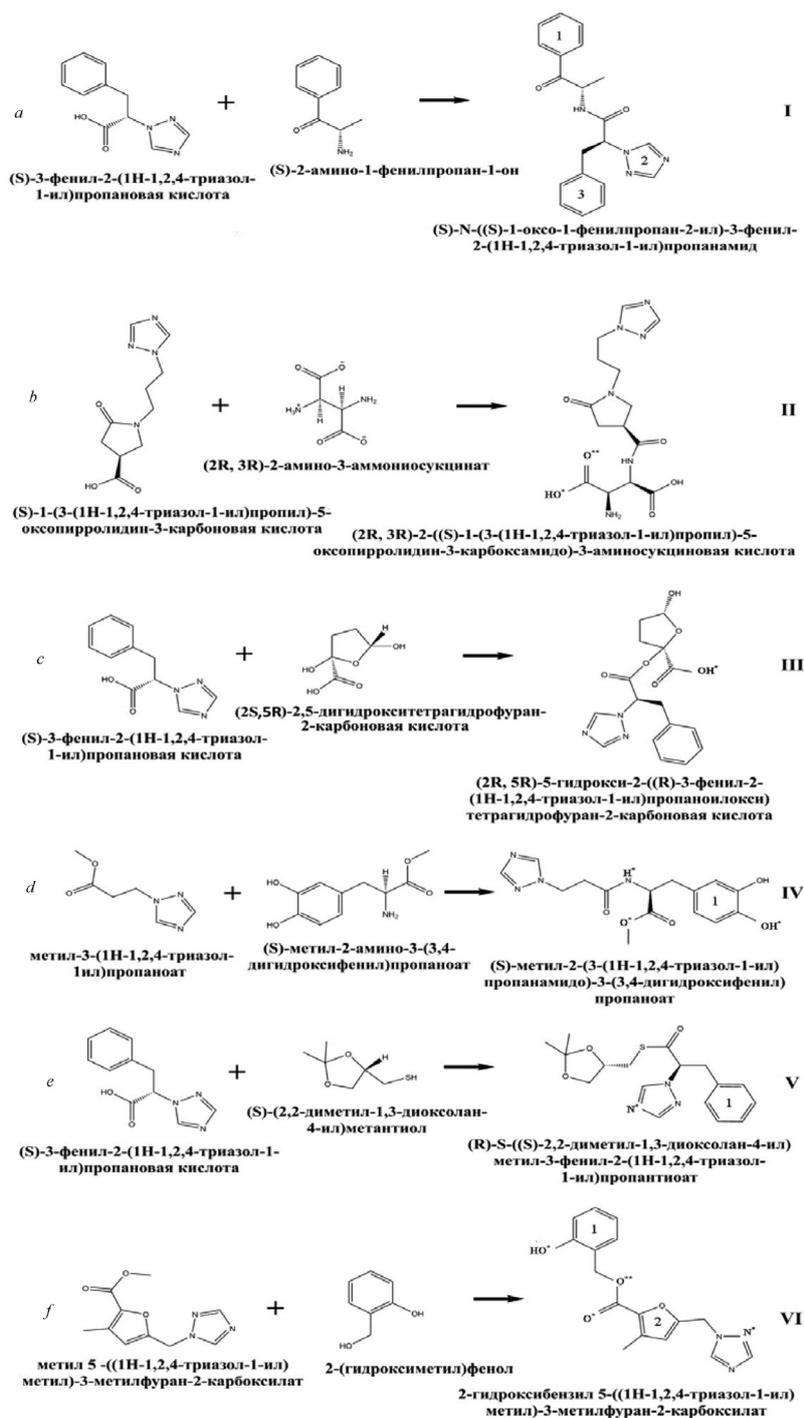


Рис. 1. Схема компьютерной сборки гибридных молекул I (a), II (b), III (c), IV (d), V (e), VI (f) – потенциальных ингибиторов ароматазы, идентифицированных на основе данных молекулярного моделирования. Показаны реагенты и продукты реакции. Приведены систематические названия этих соединений. Надстрочными звездочками отмечены атомы и функциональные группы молекул, образующие межмолекулярные водородные связи и солевые мостики (табл. 2). Цифрами обозначены π -сопряженные фрагменты лигандов, участвующие в π - π -взаимодействиях с пиррольными кольцами гема CYP19A1 (табл. 2). Соединения I–VI сконструированы путем компьютерного моделирования реакций амидирования (a, b, d), эстерификации (c), тиоэстерификации (e) и переэстерификации (f)

Fig. 1. The scheme of computer assembly of hybrid molecules I (a), II (b), III (c), IV (d), V (e), VI (f) presenting potential aromatase inhibitors identified based on the molecular modeling data. Reagents and reaction products are shown. Systematic names of these compounds are given. The superscripts indicate the functional groups of molecules forming intermolecular hydrogen bonds and salt bridges (Table 2). Numerals indicate π -conjugate fragments of the ligands involved in π - π interactions with the pyrrole rings of the CYP19A1 hem (Table 2). Compounds I–VI were designed by computer modeling of the following reactions: amidification (a, b, d), esterification (c), thioesterification (e), and transesterification (f)

Энтальпию взаимодействия вычисляли следующим образом:

$$H_{\text{связывания}} = H_{\text{комплекс}} - H_{\text{белок}} - H_{\text{лиганд}}$$

где $H_{\text{комплекс}}$ – энтальпия образования, полученная при оптимизации структуры комплекса в МОРАС; $H_{\text{белок}}$ – энтальпия образования, полученная при оптимизации рентгеновской структуры ароматазы в МОРАС; $H_{\text{лиганд}}$ – энтальпия образования, полученная при оптимизации лиганда в МОРАС из положения, найденного в программе OpenBabel.

Расчеты выполняли на компьютерном кластере Института биоорганической химии НАН Беларуси.

Результаты и их обсуждение. Анализ структурных комплексов сконструированных лигандов с ароматазой позволил выделить 6 соединений-лидеров, эффективно взаимодействующих с субстрат-связывающим сайтом фермента и характеризующихся низкими значениями энергии связывания (<-6 ккал/моль). Схема компьютерного дизайна этих гибридных молекул – конъюгатов 1,2,4-триазола, приведена на рис. 1. В табл. 1 представлены их физико-химические параметры, которые обеспечивают такие важные для лекарства свойства, как абсорбция, распределение, метаболизм, выделение и используются в «правиле пяти» Липинского для отбора лигандов, перспективных для разработки биофармацевтических препаратов [14]. Анализ данных табл. 1 показывает, что все идентифицированные лиганды ароматазы являются малыми молекулами и полностью удовлетворяют критериям, налагаемым на потенциальное лекарство правилом Липинского.

Исследование структурных комплексов этих соединений с ароматазой (рис. 2) показывает, что один из атомов азота их триазольного кольца образует координационную связь с атомом железа гема фермента, о чем свидетельствуют соответствующие межатомные расстояния, приведенные в табл. 2. Соединения II–VI образуют водородные связи с остатком Met-374, имитируя взаимодействие кольца D природного субстрата ароматазы андростендиона, один из кислородов которого участвует в водородном связывании с аминок группой Met-374 [2; 9]. Кроме того, соединение IV формирует водородные связи с остатками Thr-310, Leu-372 ароматазы и с атомом азота ее протестической группы – гема, а соединение VI – с остатками Leu-477 и Thr-310 (табл. 2). В связи с этим следует отметить, что Thr-310 представляет собой высококонсервативный остаток цитохромов P450 и совместно с Ala-306 играет важную роль в процессе гидроксирования ароматазой [2; 9]. Наряду с водородными связями, лиганд II образует солевой мостик с остатком Arg-115.

Из анализа предсказанных методами молекулярного моделирования комплексов следует, что все идентифицированные лиганды ароматазы образуют широкую сеть ван-дер-ваальсовых контактов (табл. 2, рис. 3), суммарное число которых варьирует от 32 (соединение II) до 62 (соединение I).

Т а б л и ц а 1. Химические соединения – потенциальные ингибиторы ароматазы

Table 1. Chemical compounds presenting potential aromatase inhibitors

Лиганд Ligand	Химическая формула Chemical formula	Молекулярная масса (Да) Molecular mass (Da)	LogP	Число доноров водородной связи Number of H-bond donors	Число акцепторов водородной связи Number of H-bond acceptors	Объем, Å ³ Volume, Å ³
I	C ₂₀ H ₂₀ N ₄ O ₂	348,4	2,04	1	6	318,9
II	C ₁₄ H ₁₈ N ₆ O ₆	367,3	-4,88	3	12	286,9
III	C ₁₆ H ₁₇ N ₃ O ₆	347,3	0,03	2	9	297,9
IV	C ₁₅ H ₁₈ N ₄ O ₅	334,3	-1,03	3	9	292,1
V	C ₁₇ H ₂₁ N ₃ O ₃ S	347,4	2,07	0	6	316,0
VI	C ₁₆ H ₁₅ N ₃ O ₄	313,3	1,38	1	7	269,6

Примечания: LogP – липофильность соединения (коэффициент распределения вещества в двухфазной системе n-октанол/вода). Приведенные данные получены с помощью программы DruLiTo (http://www.niper.gov.in/pi_dev_tools/DruLiToWeb/DruLiTo_index.html).

Notes: LogP – the compound lipophilicity (the coefficient of substance partition in a biphasic system n-octanol/water). The data given are obtained by the DruLiTo program (http://www.niper.gov.in/pi_dev_tools/DruLiToWeb/DruLiTo_index.html).

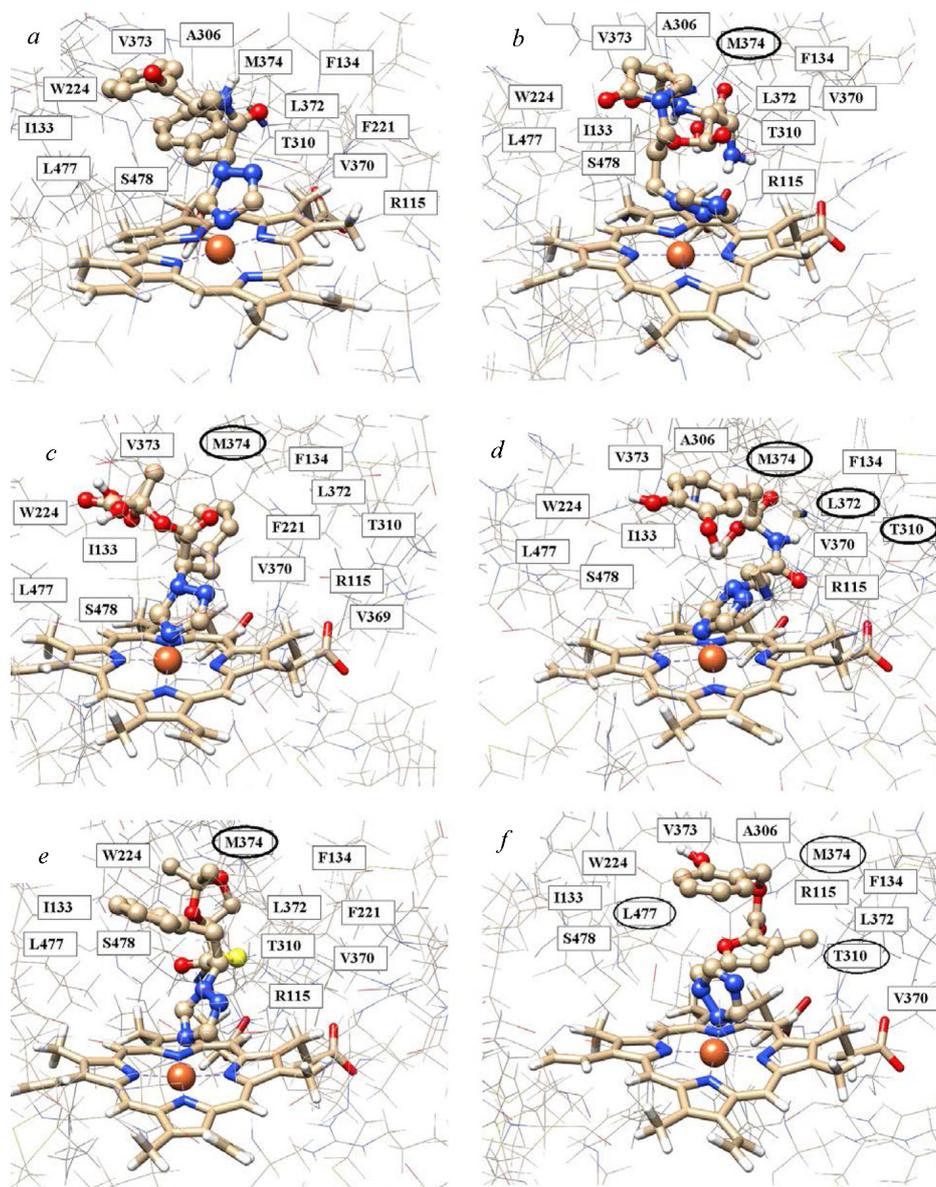


Рис. 2. Структурные комплексы соединений I (a), II (b), III (c), IV (d), V (e) и VI (f) с ароматазой. Соединения изображены с помощью модели «шарик–палочка–шарик». Остатки ароматазы, образующие ван-дер-ваальсовы контакты с лигандами, отмечены с помощью прямоугольников (табл. 2). Остатки, участвующие в водородном связывании, выделены с помощью эллипса

Fig. 2. The docked structures of compounds I (a), II (b), III (c), IV (d), V (e), and VI (f) with aromatase. The compounds are shown using “ball–stick–ball” model. The residues of aromatase forming van der Waals contacts with ligands are located in rectangles (Table 2). The residues involved in the hydrogen bonding are marked by an ellipse

Полученные данные показывают, что все эти соединения участвуют в ван-дер-ваальсовых взаимодействиях с консервативными остатками Arg-115, Ile-133, Phe-134, Trp-224, Thr-310, Val-370, Met-374, Leu-477 и Ser-478. Соединения I, III, IV, V и VI формируют ван-дер-ваальсовы контакты с остатком Leu-372, а I, II, III, IV и VI – с Val-373. Кроме того, отдельные лиганды вступают в прямые межмолекулярные контакты с остатками Phe-221 (соединения I, II, III, V), Ala-306 (соединения I, II, IV, VI) и Val-369 (соединение III). Наряду с остатками Ala-306 и Thr-310, важная роль которых в функционировании ароматазы отмечена выше, выделим остаток Ser-478: по данным [15], аминокислотные замены этой консервативной аминокислоты субстрат-связывающего сайта CYP19A1 на аланин или треонин оказывают существенное влияние на ингибиторную активность летрозола и анастрозола.

Т а б л и ц а 2. Межмолекулярные взаимодействия, реализующиеся в оптимизированных комплексах сконструированных соединений с ароматазой

Table 2. Intermolecular interactions appearing in the optimized complexes of the designed compounds with aromatase

Лиганд Ligand	Водородная связь ¹ Hydrogen bond ¹	Ван-дер-ваальсовы контакты ² Van der Waals contacts ²	Солевые мостики и π-π-взаимодействия ³ Salt bridges and π-π interactions ³	Длина связи N–F ⁴ , Å Length of N–F bond ⁴ , Å
I	–	R115(3), I133(1), F134(1), F221(1), W224(2), A306(3), T310(2), V370(8), L372(1), V373(6), M374(1), L477(7), S478(4), ГЕМ (22)	1...ГЕМ 2...ГЕМ 3...ГЕМ (π-π-стэкинг)	2,01 (4)
II	O*...NH[M374] O**...NH[M374]	R115(4), I133(2), F134(2), F221(1), W224(2), A306(3), T310(5), V370(1), V373(1), M374(1), L477(7), S478(3)	OSO...R115 (солевой мостик)	2,38 (2)
III	OH*...N[M374]	R115(3), I133(4), F134(3), F221(3), W224(3), T310(4), V369(6), V370(2), L372(3), V373(1), M374(1), L477(3), S478(1), ГЕМ (8)	–	1,99 (4)
IV	O*...NH[M374] O**...OH[T310] OH**...N[ГЕМ] NH*...O[L372]	R115(3), I133(4), F134(1), W224(2), A306(2), T310(1), V370(2), L372(4), V373(1), M374(1), L477(5), S478(2), ГЕМ (14)	1...ГЕМ (π-π-стэкинг)	2,01 (4)
V	N*...NH[M374]	R115(6), I133(2), F134(4), F221(3), W224(4), T310(2), V370(5), L372(1), M374(6), L477(5), S478(2), ГЕМ (18)	1...ГЕМ	2,01 (4)
VI	O*...NH[M374] O**...NH[M374] OH*...O[L477] N*...OH[T310]	R115(2), I133(4), F134(2), W224(1), A306(1), T310(4), V370(4), L372(2), V373(5), M374(1), L477(4), S478(6), ГЕМ (17)	1...ГЕМ 2...ГЕМ (π-π-стэкинг)	1,81 (2)
Летрозол	N*...HO[S478] N**...HN[M374]	R115(2), F134(2), F221(7), W224(6), A306(1), D309(8), T310(6), V369(2), V370(1), M374(2), L477(3), S478(3), H480(1), ГЕМ(6)	–	1,95 (4)

Примечания: ¹ – первыми указаны атомы молекулы лиганда (рис. 1), а вторыми – атомы аминокислотных остатков ароматазы (приведены в квадратных скобках в однобуквенном коде); ² – аминокислотные остатки ароматазы, формирующие ван-дер-ваальсовы контакты с лигандами. В скобках указано число контактов; ³ – для солевых мостиков первыми приведены функциональные группы лигандов, а для π-π-взаимодействий – номера их π-сопряженных систем (рис. 1); ⁴ – длина координационной связи между атомом азота 1,2,4-триазола и атомом железа гема ароматазы. В скобках указан номер атома азота триазольного цикла.

Notes: ¹ – atoms of the ligands are shown first (Figure 1), followed by the corresponding atoms of aromatase (the residues of aromatase are in brackets in one-letter code); ² – amino acids of aromatase forming van der Waals contacts with the ligands. The number of contacts is given in brackets; ³ – the functional groups of ligands and numbers of their aromatic rings (Figure 1) are shown first for salt bridges and π-π interactions, respectively; ⁴ – the length of the coordination bond between the nitrogen atom of 1,2,4-triazole and the iron atom of the aromatase gem. The number of the nitrogen atom of the triazole ring is indicated in brackets.

Как видно из данных табл. 2, полученные производные 1,2,4-триазола взаимодействуют не только с аминокислотными остатками субстрат-связывающего сайта ароматазы, но и с ее небелковой частью. За исключением лиганда II, эти соединения формируют ван-дер-ваальсовы контакты с гемом CYP19A1, а фрагменты с π-сопряженными системами соединений I, IV, V и VI (рис. 1) участвуют в специфических π-π-взаимодействиях с пиррольными кольцами протетической группы ароматазы (табл. 2).

Таким образом, данные молекулярного моделирования свидетельствуют о том, что сконструированные гибридные молекулы характеризуются близким механизмом взаимодействия с субстрат-связывающей полостью ароматазы, основу которого формируют координационная связь с атомом железа гема, межмолекулярные ван-дер-ваальсовы контакты, водородные связи (соединения II–VI), солевые мостики (соединение II) и π-стэкинг между π-сопряженными системами лигандов и пиррольных колец протетической группы фермента (соединения I, IV, V, VI) (табл. 2, рис. 3). При этом доминирующую роль в стабилизации структурных комплексов ароматазы с лигандами играют многочисленные ван-дер-ваальсовы контакты, в которые вовлечены

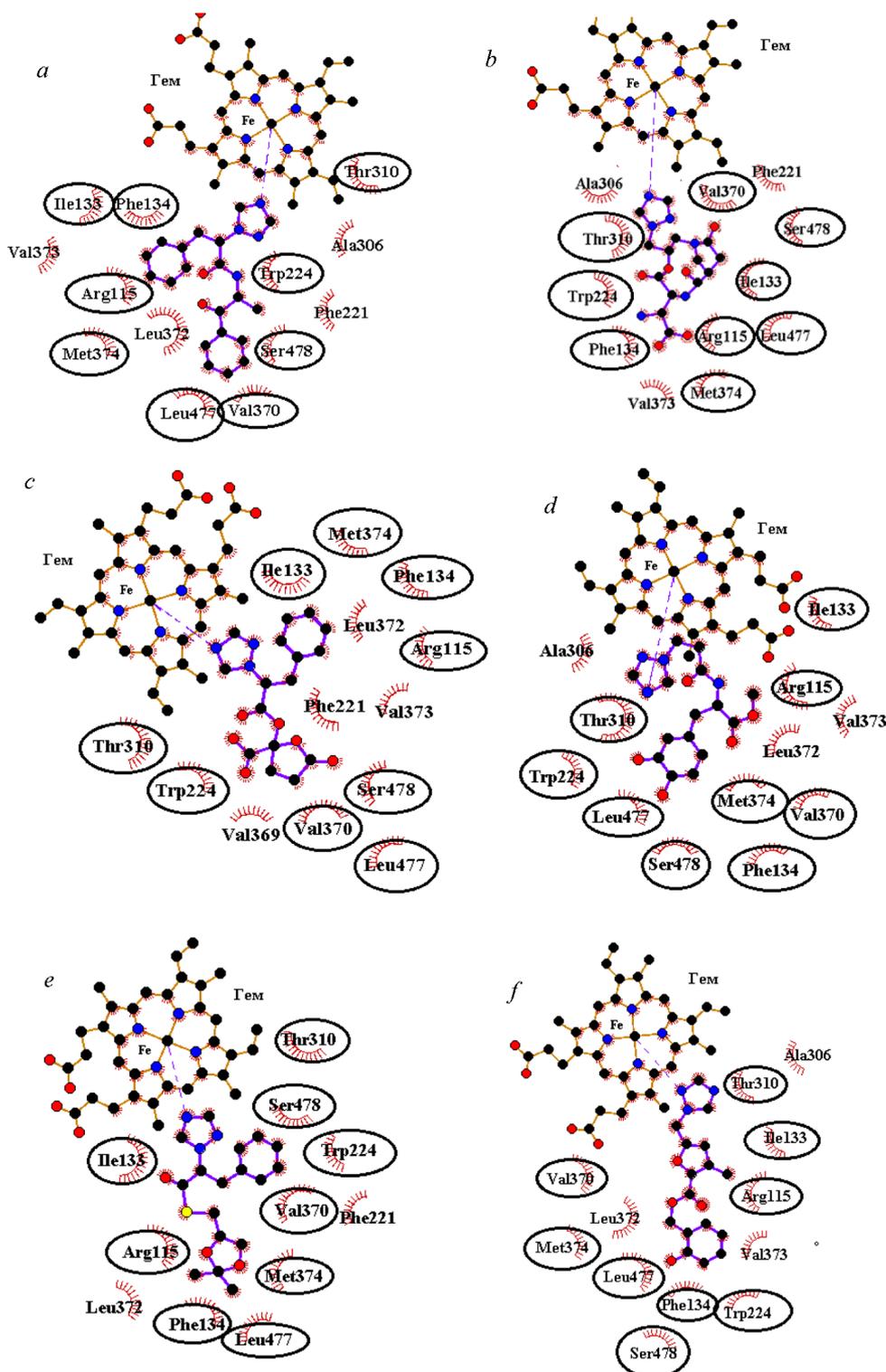


Рис. 3. Элементы структуры ароматазы, формирующие ван-дер-ваальсовы контакты с соединениями I (a), II (b), III (c), IV (d), V (e) и VI (f). Эллипсом выделены остатки, вовлеченные в ван-дер-ваальсовы взаимодействия во всех рассматриваемых случаях. Суммарное число ван-дер-ваальсовых контактов составляет: 62 (a), 32 (b), 45 (c), 42 (d), 58 (e) и 53 (f). Координационная связь показана пунктирной линией

Fig. 3. Elements of the aromarase structure making van der Waals contacts with compounds I (a), II (b), III (c), IV (d), V (e), and VI (f). Residues participating in van der Waals interactions in all of the cases of interest are marked by an ellipse. The total number of van der Waals contacts is: 62 (a), 32 (b), 45 (c), 42 (d), 58 (e), and 53 (f). A coordinate bond is shown by dotted line

как консервативные остатки гидрофобной субстрат-связывающей полости СУР19А, так и элементы структуры простетической группы фермента. Для контрольного соединения – летрозол методы молекулярного моделирования предсказывают аналогичный механизм связывания с ароматазой (табл. 2, рис. 4). Согласно расчетным данным, этот ингибитор СУР19А1 координирует атом железа простетической группы фермента, образует водородные связи с Met-374, Ser-478 и большое число ван-дер-ваальсовых контактов с участием таких аминокислотных остатков ароматазы, как Arg-115, Phe-134, Trp-224, Thr-310, Val-370, Met-374, Leu-477 и Ser-478. Как было отмечено выше, эти остатки СУР19А1 формируют прямые межатомные контакты и с идентифицированными соединениями I–VI (табл. 2, рис. 3, 4).

Эффективность межмолекулярных взаимодействий, реализующихся в структурных комплексах потенциальных лигандов с ароматазой, подтверждают предсказанные на основе данных квантово-химических расчетов величины энтальпии связывания, варьирующие в интервале от $-6,3$ до $-13,6$ ккал/моль (табл. 3). При анализе данных табл. 3 необходимо иметь в виду, что все вычислительные подходы к оценке энергии межмолекулярных взаимодействий связаны с различными приближениями, которые варьируют от упрощенных форм уравнений до приближений, ограничивающих размер системы и фундаментальных приближений в уравнениях, необходимых для решения задачи. Тем не менее, точность квантово-химического метода РМ7 – единственного полуэмпирического метода, учитывающего поправки на межмолекулярные дисперсионные взаимодействия и водородные связи (<http://openmopac.net/MOPAC2016.html>), позволяет предполагать, что значения энтальпии связывания, предсказанные для сконструированных соединений, сопоставимы с величиной $-8,7$ ккал/моль, рассчитанной для летрозол с привлечением идентичного вычислительного протокола (табл. 3).

Среди идентифицированных лигандов ароматазы следует особо отметить соединение I (рис. 1), характеризующееся существенно более низким значением энтальпии связывания по сравнению с летрозолом (табл. 3). Предсказанное значение энергии межмолекулярных взаимодействий для

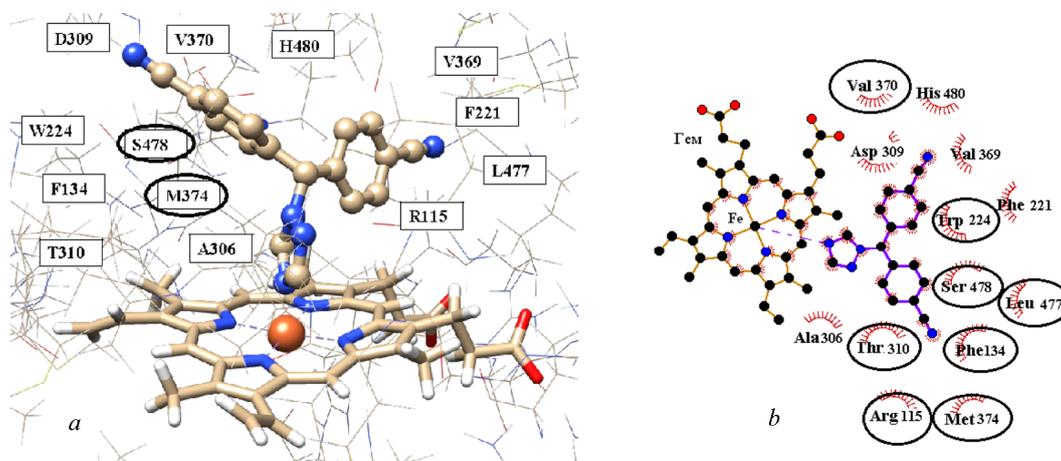


Рис. 4. Структурный комплекс летрозол с ароматазой (а) и элементы структуры СУР19А1, участвующие в межмолекулярных ван-дер-ваальсовых взаимодействиях (б). Используются обозначения, такие же, как на рис. 2 и 3

Fig. 4. The docked structure of letrozole with aromatase (a) and the structural elements of CYP19A1 participating in the intermolecular van der Waals interactions (b). The notations used are the same as in Figures 2 and 3

Т а б л и ц а 3. Величины энергии межмолекулярных взаимодействий сконструированных соединений и летрозол с ароматазой ($H_{\text{связывания}}$), вычисленные по данным квантово-химических расчетов

T a b l e 3. The values of energy for intermolecular interactions of the designed compounds and letrozole with aromatase (H_{binding}) obtained by the data of quantum chemical calculations

Лиганд Ligand	I	II	III	IV	V	VI	Летрозол Letrozole
$H_{\text{связывания}}$, ккал/моль H_{binding} , kcal/mol	-13,6	-7,9	-7,4	-7,0	-6,8	-6,3	-8,7

этого соединения составляет $-13,6$ ккал/моль (табл. 3), что, по приближенной оценке, соответствует величине константы диссоциации $K_d \sim 1,2 \cdot 10^{-10}$ М, вычисленной по формуле $K_d = e^{\Delta G / RT}$ (где ΔG – энергия связывания; R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура, равная 300 К). Соединение I формирует наибольшее число ван-дер-ваальсовых контактов с ароматазой (табл. 2, рис. 3), вносящих (совместно с электростатическими взаимодействиями) основной вклад в стабилизацию комплексов белков с лигандами, и участвует в π - π -взаимодействиях с пиррольными кольцами гема CYP19A1. В связи с этим соединение I, лучшее среди сконструированных молекул по величине энергии связывания (табл. 3), может рассматриваться в качестве первоочередного кандидата для синтеза и тестирования на биологическую активность.

Заключение. Анализ предсказанных методами молекулярного моделирования структурных комплексов сконструированных соединений с ароматазой свидетельствует о наличии специфических и эффективных взаимодействий между ними, приводящих к блокаде функционально важных элементов структуры субстрат-связывающего сайта CYP19A1. По данным квантово-химических расчетов, комплексы этих соединений с ароматазой энергетически стабильны и характеризуются низкими значениями энтальпии связывания. Полученные соединения полностью удовлетворяют «правилу пяти» Липинского и формируют перспективные базовые структуры для разработки новых эффективных лекарственных препаратов для терапии рака молочной железы.

Список использованных источников

1. Macedo, L. F. Aromatase inhibitors and breast cancer / L. F. Macedo, G. Sabnis, A. Brodie // *Ann. N. Y. Acad. Sci.* – 2009. – Vol. 1155, N 1. – P. 162–173. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2008.03689.x>
2. Structural basis for androgen specificity and oestrogen synthesis in human aromatase / D. Ghosh [et al.] // *Nature.* – 2009. – Vol. 457, N 7226. – P. 219–223. <https://doi.org/10.1038/nature07614>
3. Hong, Y. Aromatase inhibitors: structural features and biochemical characterization / Y. Hong, S. Chen // *Ann. N. Y. Acad. Sci.* – 2006. – Vol. 1089, N 1. – P. 237–251. <https://doi.org/10.1196/annals.1386.022>
4. Dutta, U. Aromatase inhibitors: past, present and future in breast cancer therapy / U. Dutta, K. Pant // *Med. Oncol.* – 2008. – Vol. 25, N 2. – P. 113–124. <https://doi.org/10.1007/s12032-007-9019-x>
5. Ghosh, D. Recent Progress in the Discovery of Next Generation Inhibitors of Aromatase from the Structure–Function Perspective / D. Ghosh, J. Lo, C. Egbuta // *J. Med. Chem.* – 2016. – Vol. 59, N 11. – P. 5131–5148. <https://doi.org/10.1021/acs.jmedchem.5b01281>
6. Pharmacophore modeling and in silico screening for new P450 19 (aromatase) inhibitors / D. Schuster [et al.] // *J. Chem. Inf. Model.* – 2006. – Vol. 46, N 3. – P. 1301–1311. <https://doi.org/10.1021/ci050237k>
7. Fast three dimensional pharmacophore virtual screening of new potent non-steroid aromatase inhibitors / M. A. Neves [et al.] // *J. Med. Chem.* – 2009. – Vol. 52, N 1. – P. 143–150. <https://doi.org/10.1021/jm800945c>
8. An efficient steroid pharmacophore-based strategy to identify new aromatase inhibitors / M. A. Neves [et al.] // *Eur. J. Med. Chem.* – 2009. – Vol. 44, N 10. – P. 4121–4127. <https://doi.org/10.1016/j.ejmech.2009.05.003>
9. X-ray structure of human aromatase reveals an androgen-specific active site / D. Ghosh [et al.] // *J. Steroid Biochem. Mol. Biol.* – 2010. – Vol. 118, N 4–5. – P. 197–202. <https://doi.org/10.1016/j.jsbmb.2009.09.012>
10. Structure-activity relationships and docking studies of synthetic 2-arylindole derivatives determined with aromatase and quinone reductase 1 / A. M. Prior [et al.] // *Bioorganic Med. Chem. Letters.* – 2017. – Vol. 27, N 24. – P. 5393–5399. <https://doi.org/10.1016/j.bmcl.2017.11.010>
11. Binding mode of triazole derivatives as aromatase inhibitors based on docking, protein ligand interaction fingerprinting, and molecular dynamics simulation studies / A. Mojaddami [et al.] // *Res. Pharm. Sci.* – 2017. – Vol. 12, N 1. – P. 21–30. <https://doi.org/10.4103/1735-5362.199043>
12. Pharmacophore Modeling and in Silico/in Vitro Screening for Human Cytochrome P450 11B1 and Cytochrome P450 11B2 Inhibitors / M. Akram [et al.] // *Front. Chem.* – 2017. – Vol. 5. – P. 104. <https://doi.org/10.3389/fchem.2017.00104>
13. Kolb, H. C. Click chemistry: Diverse chemical function from a few good reactions / H. C. Kolb, M. G. Finn, K. B. Sharpless // *Angew. Chem. Int. Ed.* – 2001. – Vol. 40, N 11. – P. 2004–2021. [https://doi.org/10.1002/1522-3773\(20010601\)40:11%3C2004::aid-anie2004%3E3.0.co;2-5](https://doi.org/10.1002/1522-3773(20010601)40:11%3C2004::aid-anie2004%3E3.0.co;2-5)
14. Experimental and computational approaches to estimate solubility and permeability in drug discovery and development settings / C. A. Lipinski [et al.] // *Adv. Drug Deliv. Rev.* – 2001. – Vol. 46, N 1–3. – P. 3–26. [https://doi.org/10.1016/s0169-409x\(00\)00129-0](https://doi.org/10.1016/s0169-409x(00)00129-0)
15. Evaluation of the mechanism of aromatase cytochrome P450 / Y. C. Kao [et al.] // *Eur. J. Biochem.* – 2001. – Vol. 268, N 2. – P. 243–251. <https://doi.org/10.1046/j.1432-1033.2001.01886.x>

References

1. Macedo L. F., Sabnis G., Brodie A. Aromatase inhibitors and breast cancer. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2009, vol. 1155, no. 1, pp. 162–173. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2008.03689.x>

2. Ghosh D., Griswold J., Erman M., Pangborn W. Structural basis for androgen specificity and oestrogen synthesis in human aromatase. *Nature*, 2009, vol. 457, no. 7226, pp. 219–223. <https://doi.org/10.1038/nature07614>
3. Hong Y., Chen S. Aromatase inhibitors: structural features and biochemical characterization. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2006, vol. 1089, no. 1, pp. 237–251. <https://doi.org/10.1196/annals.1386.022>
4. Dutta U., Pant K. Aromatase inhibitors: past, present and future in breast cancer therapy. *Medical Oncology*, 2008, vol. 25, no. 2, pp. 113–124. <https://doi.org/10.1007/s12032-007-9019-x>
5. Ghosh D., Lo J., Egbuta C. Recent progress in the discovery of next generation inhibitors of aromatase from the structure–function perspective. *Journal of Medicinal Chemistry*, 2016, vol. 59, no. 11, pp. 5131–5148. <https://doi.org/10.1021/acs.jmedchem.5b01281>
6. Schuster D., Laggner C., Steindl T. M., Paluszczak A., Hartmann R. W., Langer T. Pharmacophore modeling and in silico screening for new P450 19 (aromatase) inhibitors. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 2006, vol. 46, no. 3, pp. 1301–1311. <https://doi.org/10.1021/ci050237k>
7. Neves M. A., Dinis T. C., Colombo G., Sá e Melo M. L. Fast three dimensional pharmacophore virtual screening of new potent non-steroid aromatase inhibitors. *Journal of Medicinal Chemistry*, 2009, vol. 52, no. 1, pp. 143–150. <https://doi.org/10.1021/jm800945c>
8. Neves M. A., Dinis T. C., Colombo G., Sá e Melo M. L. An efficient steroid pharmacophore-based strategy to identify new aromatase inhibitors. *European Journal of Medicinal Chemistry*, 2009, vol. 44, no. 10, pp. 4121–4127. <https://doi.org/10.1016/j.ejmech.2009.05.003>
9. Ghosh D., Griswold J., Erman M., Pangborn W. X-ray structure of human aromatase reveals an androgen-specific active site. *Journal of Steroid Biochemistry and Molecular Biology*, 2010, vol. 118, no. 4–5, pp. 197–202. <https://doi.org/10.1016/j.jsmb.2009.09.012>
10. Prior A. M., Yu X., Park E.-J., Kondratyuk T. P., Lin Y., Pezzuto J. M., Sun D. Structure-activity relationships and docking studies of synthetic 2-arylindole derivatives determined with aromatase and quinone reductase 1. *Bioorganic and Medicinal Chemistry Letters*, 2017, vol. 27, no. 24, pp. 5393–5399. <https://doi.org/10.1016/j.bmcl.2017.11.010>
11. Mojaddami A., Sakhteman A., Fereidoonzhad M., Faghieh Z., Najdian A., Khahnadideh S., Sadeghpour H., Rezaei Z. Binding mode of triazole derivatives as aromatase inhibitors based on docking, protein ligand interaction fingerprinting, and molecular dynamics simulation studies. *Research in Pharmaceutical Sciences*, 2017, vol. 12, no. 1, pp. 21–30. <https://doi.org/10.4103/1735-5362.199043>
12. Akram M., Waratchareeyakul W., Haupenthal J., Hartmann R. W., Schuster D. Pharmacophore Modeling and in Silico/in Vitro Screening for Human Cytochrome P450 11B1 and Cytochrome P450 11B2 Inhibitors. *Frontiers in Chemistry*, 2017, vol. 5, pp. 104. <https://doi.org/10.3389/fchem.2017.00104>
13. Kolb H. C., Finn M. G., Sharpless K. B. Click chemistry: Diverse chemical function from a few good reactions. *Angewandte Chemie International Edition*, 2001, vol. 40, no. 11, pp. 2004–2021. [https://doi.org/10.1002/1521-3773\(20010601\)40:11%3C2004::aid-anie2004%3E3.0.co;2-5](https://doi.org/10.1002/1521-3773(20010601)40:11%3C2004::aid-anie2004%3E3.0.co;2-5)
14. Lipinski C. A., Lombardo F., Dominy B. W., Feeney P. J. Experimental and computational approaches to estimate solubility and permeability in drug discovery and development settings. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 2001, vol. 46, no. 1–3, pp. 3–26. [https://doi.org/10.1016/s0169-409x\(00\)00129-0](https://doi.org/10.1016/s0169-409x(00)00129-0)
15. Kao Y. C., Korzekwa K. R., Laughton C. A., Chen S. Evaluation of the mechanism of aromatase cytochrome P450. *European Journal of Biochemistry*, 2001, vol. 268, no. 2, pp. 243–251. <https://doi.org/10.1046/j.1432-1033.2001.01886.x>

Информация об авторах

Андреанов Александр Михайлович – д-р хим. наук, гл. науч. сотрудник. Институт биоорганической химии НАН Беларуси (ул. Купревича, 5/2, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: andrianov@iboch.bas-net.by.

Николаев Григорий Игоревич – аспирант. Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси (ул. Сурганова, 6, 220012, Минск, Республика Беларусь). E-mail: reshaemvsem@gmail.com.

Кашин Иван Александрович – канд. хим. наук, ст. науч. сотрудник. Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси (ул. Сурганова, 6, 220012, Минск, Республика Беларусь). E-mail: lighkia@gmail.com.

Корноушенко Юрий Валерьевич – канд. хим. наук, ст. науч. сотрудник. Институт биоорганической химии НАН Беларуси (ул. Купревича, 5/2, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: kornoushenko@iboch.bas-net.by.

Усанов Сергей Александрович – член-корреспондент, д-р хим. наук, профессор. Институт биоорганической химии НАН Беларуси (ул. Купревича, 5/2, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: usanov@iboch.bas-net.by.

Information about the authors

Andrianov Alexander Mikhailovich – D. Sc. (Chemistry), Chief researcher. Institute of Bioorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (5/2, Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: andrianov@iboch.bas-net.by.

Nikolaev Gregory Igorevich – Postgraduate student. United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus (6, Sarganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: reshaemvsem@gmail.com.

Kashyn Ivan Aleksandrovich – Ph. D. (Chemistry), Senior researcher. United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus (6, Sarganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lighkia@gmail.com.

Kornoushenko Yury Valerievich – Ph. D. (Chemistry), Senior researcher. Institute of Bioorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (5/2, Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kornoushenko@iboch.bas-net.by.

Usanov Sergey Aleksandrovich – Corresponding Member, D. Sc. (Chemistry), Professor. Institute of Bioorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (5/2, Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: usanov@iboch.bas-net.by.

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

УДК 547.539.1.615.012.1
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-3-293-297>

Поступило в редакцию 04.05.2018
Received 04.05.2018

А. В. Зураев¹, А. В. Лишай², Ю. В. Григорьев¹, академик О. А. Ивашкевич³

¹Научно-исследовательский институт физико-химических проблем
Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь

²Белорусский государственный медицинский университет, Минск, Республика Беларусь

³Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

СИНТЕЗ И АНТИБАКТЕРИАЛЬНАЯ АКТИВНОСТЬ НЕКОТОРЫХ 1,4- И 1,4,5-ЗАМЕЩЕННЫХ-1H-1,2,3-ТРИАЗОЛОВ ПО ОТНОШЕНИЮ К ШТАММУ *STAPHYLOCOCCUS AUREUS*

Аннотация. С использованием модифицированной каталитической системы для реакции Хьюзеновского [3+2]-циклоприсоединения получен ряд 1,4- и 1,4,5-замещенных-1H-1,2,3-триазолов. Установлено, что синтезированные производные 1H-1,2,3-триазолов проявляют высокую антибактериальную активность в отношении патогенного штамма *Staphylococcus aureus*, сопоставимую с широко используемым в клинической практике антибиотиком «Цефотаксим».

Ключевые слова: цефотаксим, *Staphylococcus aureus*, 1H-1,2,3-триазолы, биоактивность, наночастицы меди

Для цитирования: Синтез и антибактериальная активность некоторых 1,4- и 1,4,5-замещенных-1H-1,2,3-триазолов по отношению к штамму *Staphylococcus aureus* / А. В. Зураев [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 3. – С. 293–297. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-3-293-297>

Alexander V. Zuraev¹, Anastasia V. Lishai², Yuri V. Grigoriev¹, Academician Oleg A. Ivashkevich³

¹Research Institute for Physical Chemical Problems of the Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

²Belarussian State Medical University, Minsk, Republic of Belarus

³Belarussian State University, Minsk, Republic of Belarus

SYNTHESIS AND ANTIBACTERIAL ACTIVITY OF SOME 1,4- AND 1,4,5-SUBSTITUTED-1H-1,2,3- TRIAZOLES IN RELATION TO THE *STAPHYLOCOCCUS AUREUS* STRAIN

Abstract. A number of 1,4- and 1,4,5-triazoles have been synthesized using a modified catalytic system for the Huisgen [3+2] cycloaddition reaction. The bactericidal activity of the synthesized compounds has been studied. The synthesized derivatives of 1H-1,2,3-triazoles have demonstrated higher antibacterial activities in relation to the pathogen *Staphylococcus aureus* strain which can be comparable with the clinically used antibiotic “Cefotaxime”.

Keywords: Cefotaxime, *Staphylococcus aureus*, 1H-1,2,3-triazoles, bioactivity, copper nanoparticles

For citation: Zuraev A. V., Lishai A. V., Grigoriev Y. V., Ivashkevich O. A. Synthesis and antibacterial activity of some 1,4- and 1,4,5-substituted-1H-1,2,3-triazoles in relation to *Staphylococcus aureus* strain. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2018, vol. 62, no. 3, pp. 293–297 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-3-293-297>

1,2,3-1H-Триазол представляет собой пятичленный азотсодержащий гетероцикл, производные которого широко применяются в синтетической органической, медицинской и фармацевтической химии [1–3]. Например, среди представителей этого класса соединений найдены и используются в клинической практике препараты для терапии многих вирусных инфекций, некоторых разновидностей рака и ряда проявлений аллергических реакций [4]. Следует также отметить, что наличие в структуре соединения 1,2,3-триазольного фрагмента является достаточно важным фактором для проявления им антибактериальной активности [5].

Классическим методом синтеза производных 1,2,3-триазола является катализируемая солями меди(I) реакция Хьюзеновского [3+2]-циклоприсоединения азидов к терминальным алкинам [5]. Недавно нами показано, что эффективным катализатором этой реакции является продукт термического разложения поли-5-винилтетразолата меди, представляющий собой полимерную рентгеноаморфную матрицу с инкорпорированными наночастицами меди [6]. С использованием

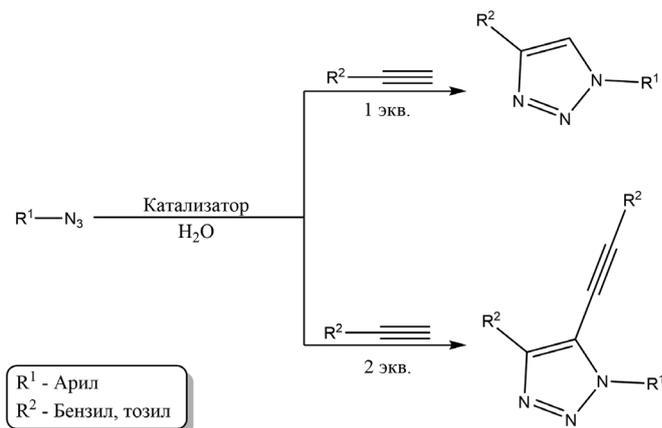


Рис. 1. Общая схема синтеза 1,4- и 1,4,5-замещенных-1H-1,2,3-триазолов

Fig. 1. General synthesis scheme of 1,4- and 1,4,5-substituted-1H-1,2,3-triazoles

предварительно выращенную на скошенном мясо-пептонном агаре (МПА) культуру микроорганизмов. Антибактериальную активность определяли с использованием метода диффузии в агар. Стандартная бактериальная суспензия готовилась на основе стерильного 0,9 %-ного раствора хлорида натрия. Для этого бактериологической петлей вносили исследуемую культуру во флакон со стерильным физраствором и доводили концентрацию микроорганизмов до значения 0,5 единиц стандарта мутности по McFarland [8]. На застывший агар в стерильных условиях в чашки Петри вносили по 1,0 мл соответствующей взвеси микроорганизмов. После равномерного распределения микроорганизмов по всей поверхности агара, чашки инкубировали при комнатной температуре в течение 15–20 мин. Затем на чашках с микроорганизмами делали по пять лунок диаметром 6,0 мм. Далее в четыре лунки вносили по 20 мкл тестируемых образцов и образец стандарта в определенных концентрациях (1000 и 2000 мкг/мл). Пробы инкубировали

этого нового катализатора при комнатной температуре в водной среде с высоким выходом получен ряд 1,4- и 1,4,5-замещенных-1H-1,2,3-триазолов (рис. 1) [7], исследованию антибактериальной активности которых в отношении патогенного штамма *Staphylococcus aureus*, выделенного от пациента¹, посвящена настоящая работа.

Структурные формулы исследованных триазолсодержащих соединений представлены на рис. 2.

Строение синтезированных триазолов **1a–1g** подтверждено данными ЯМР-спектроскопии и ЖХ-МС спектрометрии.

Для изучения антибактериальной активности соединений **1a–1g** по отношению к *S. aureus* использовали чистую

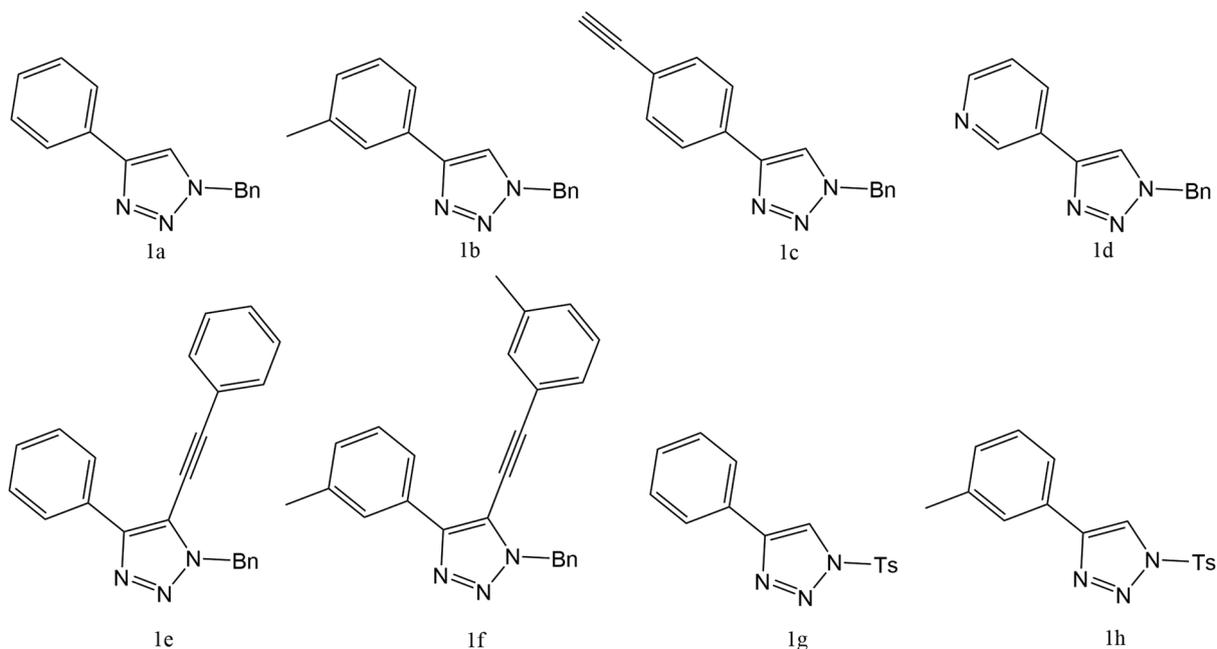


Рис. 2. Синтезированные 1,4- и 1,4,5-замещенные-1H-1,2,3-триазолы

Fig. 2. Synthesized 1,4- and 1,4,5-substituted-1H-1,2,3-triazoles

¹ Микробиологические методы исследования биологического материала: инструкция по применению № 075-0210: утв. Заместителем Министра здравоохранения Республики Беларусь – Главным государственным санитарным врачом Республики Беларусь 19.03.2010 г. – Минск, 2010. – 123 с.

в течение 24 ч, после чего проводили оценку диаметра зоны ингибирования роста микроорганизмов. Учет результатов проводили по наличию или отсутствию роста бактерий вокруг лунок путем измерения диаметра зоны вокруг лунки в миллиметрах. Результаты определения антибактериальной активности соединений **1a–1g** по отношению к *S. aureus* приведены в таблице.

Результаты определения антибактериальной активности 1,4- и 1,4,5-замещенных-1H-1,2,3-триазолов 1a–1g и стандарта (Цефотаксим) по отношению к *S. aureus*

Results of definition of the antibacterial activity of 1,4- and 1,4,5-substituted-1H-1,2,3-triazoles 1a–1g and the standard (Cefotaxime) in relation to *S. aureus*

Соединение Compound	Диаметр зоны ингибирования, мм Inhibition zone diameter, mm	
	1000 мкг/мл	2000 мкг/мл
1a	24	28
1b	29	36
1c	24	28
1d	23	26
1e	25	29
1f	29	37
1g	27	32
Стандарт (Цефотаксим)	25	30

Из данных, приведенных в таблице, следует, что все изученные производные 1,2,3-триазола проявляют активность по отношению к *S. aureus*. При этом активность большинства из них близка к активности широко используемого в настоящее время в клинической практике антибиотика Цефотаксим, а соединения **1b**, **1f** и **1g** заметно ее превосходят.

Таким образом, результаты проведенного первичного исследования антибактериальной активности синтезированных 1,4- и 1,4,5-замещенных-1H-1,2,3-триазолов демонстрируют перспективность дальнейшего изучения их биологической активности и токсичности, а также несомненный интерес для направленного синтеза новых 1,2,3-триазолсодержащих соединений, проявляющих антибактериальную активность.

Экспериментальная часть. Соединения **1a–1g** получены по методике, описанной нами в [7]. Все реактивы, используемые для синтеза, применялись без предварительной очистки. Температуры плавления определены на приборе Digital Melt-Temp 3.0. Тонкослойную хроматографию проводили на хроматографических пластинках Merck (30 × 100 мм²), в качестве элюента использовали смесь этилацетат–гексан (в объемном соотношении 1 : 8). Масс-спектры получали методом электро-спрей ионизации на приборе Shimadzu LCMS-QP5050A. Спектры ЯМР ¹H регистрировали в CDCl₃ на приборе Brüker Advance 500 spectrometer (рабочая частота 500,13 МГц). Чистота соединений составляла не менее 99 %.

1-Бензил-4-фенил-1H-1,2,3-триазол 1a. Белые игольчатые кристаллы; т. пл. 123–125 °С; ЯМР ¹H, (δ, м. д.): 7,30–7,35 (m, 3H), 7,37–7,42 (m, 5H), 7,66 (s, 1H), 7,78–7,81 (m, 2H), 5,58 (s, 2H); HRMS (ESI+) расчетное значение [M+Na]⁺ 258,1009, полученное значение [M+Na]⁺ 258,1016.

1-Бензил-4-(3-толил)-1H-1,2,3-триазол 1b. Белые игольчатые кристаллы; т. пл. 146–147 °С; ЯМР ¹H (δ, м. д.): 7,65–7,55 (m, 3H), 7,41–7,10 (m, 7H), 5,54 (s, 2H), 2,36 (s, 3H); HRMS (ESI+) расчетное значение [M+Na]⁺ 272,3152, полученное значение [M+Na]⁺ 272,3151.

1-Бензил-4-(4-фенилэтинил)-1H-1,2,3-триазол 1c. Белые игольчатые кристаллы; т. пл. 167–168 °С; ЯМР ¹H (δ, м. д.): 7,75 (d, 2H), 7,67 (s, 1H), 7,51 (d, 2H), 7,40–7,29 (m, 5H), 5,56 (s, 2H), 3,11 (s, 1H); HRMS (ESI+) расчетное значение [M+H]⁺ 260,1188, полученное значение [M+H]⁺ 260,1187.

3-(1-Бензил-1H-1,2,3-триазол-4-ил)пиридин 1d. Белые игольчатые кристаллы; т. пл. 101–102 °С; ЯМР ¹H (δ, м. д.): 8,98 (s, 1H), 8,56 (d, 1H), 8,16–8,20 (m, 1H), 7,80 (s, 1H), 7,31–7,43 (m, 6H), 5,60 (s, 2H); HRMS (ESI+) расчетное значение [M+H]⁺ 237,2188, полученное значение [M+H]⁺ 237,2186.

1-Бензил-4-фенил-5-(фенилэтинил)-1*H*-1,2,3-триазол 1e. Белые игольчатые кристаллы; т. пл. 94–96 °С; ЯМР ¹H (δ, м. д.): 8,18 (d, 2H); 7,38 (m, 13H); 5,64 (s, 2H); HRMS (ESI+) расчетное значение [M+H]⁺ 336,1495, полученное значение [M+H]⁺ 336,1498.

1-Бензил-4-(*m*-толил)-5-(*m*-толилэтинил)-1*H*-1,2,3-триазол 1f. Белые игольчатые кристаллы; т. пл. 98–101 °С; ЯМР ¹H (δ, м. д.): 8,06–7,94 (m, 2H), 7,41–7,25 (m, 11H), 5,73 (s, 2H), 2,43 (s, 3H), 2,38 (s, 3H); HRMS (ESI): *m* / *z* = 364,0275, расчетное значение [M+H]⁺ 364,0280, полученное значение [M+H]⁺ 364,0279.

4-Фенил-1-тозил-1*H*-1,2,3-триазол 1g. Белые игольчатые кристаллы; т. пл. 106–108 °С; ЯМР ¹H (δ, м. д.): 8,32 (s, 1H), 8,02 (d, 2H), 7,82 (d, 2H), 7,48–7,34 (m, 5H), 2,44 (s, 3H). HRMS (ESI): *m* / *z* = 322,0275, расчетное значение [M+Na]⁺ 322,0280, полученное значение [M+Na]⁺ 322,0278.

4-(*m*-толил)-1-тозил-1*H*-1,2,3-триазол 1h. Белые игольчатые кристаллы; т. пл. 102–104 °С; ЯМР ¹H (δ, м. д.): 8,66 (s, 1H), 8,05–7,22 (m, 8H), 2,43 (s, 3H), 2,38 (s, 3H); HRMS (ESI): *m* / *z* = 314,0275, расчетное значение [M+H]⁺ 314,0280, полученное значение [M+H]⁺ 314,0278.

Список использованных источников

1. Synthesis of Pentafluorosulfanylpyrazole and Pentafluorosulfanyl-1,2,3-triazole and Their Derivatives as Energetic Materials by Click Chemistry / C. F. Ye [et al.] // *Org. Lett.* – 2007. – Vol. 9, N 19. – P. 3841–3844. <https://doi.org/10.1021/ol701602a>
2. Oxidative Palladium Catalysis in SNAr Reactions Leading to Heteroaryl Ethers from Pyridotriazol-1-yloxy Heterocycles with Aryl Boronic Acids / S. Wacharasindhu [et al.] // *J. Am. Chem. Soc.* – 2009. – Vol. 131, N 12. – P. 4174–4175. <https://doi.org/10.1021/ja808622z>
3. Click Chemistry Reactions in Medicinal Chemistry: Applications of the 1,3-Dipolar cycloaddition between Azides and Alkynes / G. C. Tron [et al.] // *Med. Res. Rev.* – 2008. – Vol. 28, N 2. – P. 278–308. <https://doi.org/10.1002/med.20107>
4. Substituent Effects on the Antibacterial Activity of Nitrogen-Carbon-Linked (Azolyphenyl)oxazolidinones with Expanded Activity Against the Fastidious Gram-Negative Organisms *Haemophilus influenzae* and *Moraxella catarrhalis* / M. J. Genin [et al.] // *J. Med. Chem.* – 2000. – Vol. 43, N 5. – P. 953–970. <https://doi.org/10.1021/jm990373e>
5. Efficient and tunable synthesis of new polydentate bifunctional chelating agents using click chemistry / C. Camp [et al.] // *Tetrahedron Lett.* – 2008. – Vol. 49. – P. 1979–1983. <https://doi.org/10.1016/j.tetlet.2008.01.086>
6. Copper-Polymer Nanocomposite Catalyst for Synthesis of 1,4-Diphenylbutadiyne-1,3 / A. V. Zuraev [et al.] // *Z. Anorg. Allg. Chem.* – 2017. – Vol. 643, N 19. – P. 1215–1219. <https://doi.org/10.1002/zaac.201700213>
7. Copper-polymer nanocomposite: an efficient catalyst for green Huisgen click synthesis / A. V. Zuraev [et al.] // *Tetrahedron Lett.* – 2018. – Vol. 59, N 16. – P. 1583–1586. <https://doi.org/10.1016/j.tetlet.2018.03.028>
8. Государственная фармакопея Республики Беларусь: в 2 т. / Центр экспертиз и испытаний в здравоохранении; под общ. ред. А. А. Шерякова. – Молодечно: Победа, 2012. – Т. 1: Общие методы контроля качества лекарственных средств. – 1220 с.

References

1. Ye C. F., Gard G. L., Winter R. W., Syvret R. G., Twamley B., Shreeve J. M. Synthesis of Pentafluorosulfanylpyrazole and Pentafluorosulfanyl-1,2,3-triazole and Their Derivatives as Energetic Materials by Click Chemistry. *Organic Letters*, 2007, vol. 9, no. 19, pp. 3841–3844. <https://doi.org/10.1021/ol701602a>
2. Wacharasindhu S., Bardhan S., Zhao-Kui Wan, Tabei K., Mansour T. S. Oxidative Palladium Catalysis in SNAr Reactions Leading to Heteroaryl Ethers from Pyridotriazol-1-yloxy Heterocycles with Aryl Boronic Acids. *Journal of the American Chemical Society*, 2009, vol. 131, no. 12, pp. 4174–4175. <https://doi.org/10.1021/ja808622z>
3. Tron G. C., Pirali T., Billington R. A., Canonico P. L., Sorba G., Genazzani A. A. Click Chemistry Reactions in Medicinal Chemistry: Applications of the 1,3-Dipolar cycloaddition between Azides and Alkynes. *Medicinal Research Reviews*, 2008, vol. 28, no. 2, pp. 278–308. <https://doi.org/10.1002/med.20107>
4. Genin M. J., Allwine D. A., Anderson D. J., Barbachyn M. R., Emmert D. E., Garmon S. A., Graber D. R., Grega K. C., Hester J. B., Hutchinson D. K., Morris J., Reischer R. J., Ford C. W., Zurenko G. E., Hamel J. C., Schaadt R. D., Stapert D., Yagi B. H. Substituent Effects on the Antibacterial Activity of Nitrogen-Carbon-Linked (Azolyphenyl)oxazolidinones with Expanded Activity Against the Fastidious Gram-Negative Organisms *Haemophilus influenzae* and *Moraxella catarrhalis*. *Journal of Medicinal Chemistry*, 2000, vol. 43, no. 5, pp. 953–970. <https://doi.org/10.1021/jm990373e>
5. Camp C., Dorbes S., Picard C., Benoist E. Efficient and tunable synthesis of new polydentate bifunctional chelating agents using click chemistry. *Tetrahedron Letters*, 2008, vol. 49, pp. 1979–1983. <https://doi.org/10.1016/j.tetlet.2008.01.086>
6. Zuraev A. V., Grigoriev Y. V., Ivashkevich L. S., Lyakhov A. S., Ivashkevich O. A. Copper-Polymer Nanocomposite Catalyst for Synthesis of 1,4-Diphenylbutadiyne-1,3. *Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie*, 2017, vol. 643, no. 19, pp. 1215–1219. <https://doi.org/10.1002/zaac.201700213>
7. Zuraev A. V., Grigoriev Y. V., Budevich V. A., Ivashkevich O. A. Copper-polymer nanocomposite: an efficient catalyst for green Huisgen click synthesis. *Tetrahedron Letters*, 2018, vol. 59, no. 16, pp. 1583–1586. <https://doi.org/10.1016/j.tetlet.2018.03.028>
8. Sheryakov A. A., eds. *State Pharmacopoeia of the Republic of Belarus. Vol. 1. General methods of quality control of medicines*. Molodechno, Pobeda Publ., 2012. 1220 p. (in Russian).

Информация об авторах

Зураев Александр Викторович – мл. науч. сотрудник. НИИ физико-химических проблем БГУ (ул. Ленинградская, 14, 220050, Минск, Республика Беларусь). E-mail: alex.zuraev@gmail.com.

Лишай Анастасия Викторовна – ассистент. Белорусский государственный медицинский университет (пр. Дзержинского, 83, 220116, Минск, Республика Беларусь). E-mail: nastassia.lishai@gmail.com.

Григорьев Юрий Викторович – канд. хим. наук, заведующий лабораторией. НИИ физико-химических проблем БГУ (ул. Ленинградская, 14, 220050, Минск, Республика Беларусь). E-mail: azole@bsu.by.

Ивашкевич Олег Анатольевич – академик, д-р хим. наук, профессор, первый проректор. Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: IvashkevichO@bsu.by.

Information about the authors

Zuraev Alexander Victorovich – Junior researcher. Research Institute for Physical Chemical Problems of the Belarusian State University (14, Leningradskaya Str., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: alex.zuraev@gmail.com.

Lishai Anastasia Victorovna – Assistant. Belarusian State Medical University (83, Dzerzhinsky Ave., 220116, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nastassia.lishai@gmail.com.

Grigoriev Yuri Victorovich – Ph. D. (Chemistry), Head of Laboratory. Research Institute for Physical Chemical Problems of the Belarusian State University (14, Leningradskaya Str., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: azole@bsu.by.

Ivashkevich Oleg Anatolievich – Academician, D. Sc. (Chemistry), Professor, First prorector. Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: IvashkevichO@bsu.by.

ISSN 1561-8323 (Print)

ISSN 2524-2431 (Online)

УДК 546.284-31:544.722.13

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-3-298-303>

Поступило в редакцию 17.01.2018

Received 17.01.2018

А. Е. Соломянский¹, Д. А. Коленченко¹, Г. Б. Мельникова²,
Ю. В. Синькевич³, академик В. Е. Агабеков¹

¹Институт химии новых материалов Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь

²Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь

³Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

ГИДРО- И ОЛЕОФОБНЫЕ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ ПОЛИВИНИЛОВОГО СПИРТА И НАНОЧАСТИЦ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ

Аннотация. Изучена смачиваемость композиционных покрытий на основе поливинилового спирта (ПВС) и диоксида кремния, сформированных на кремнии методом центрифугирования из коллоидов наночастиц SiO₂ в ПВС. Установлено, что данные покрытия, модифицированные гидролизированным гептадекафтортетрагидродецилтриметоксисилоном, проявляют супергидрофобные и олеофобные свойства. Показано, что ПВС увеличивает стабильность покрытий SiO₂–ПВС к механическому воздействию.

Ключевые слова: наночастицы оксида кремния, поливиниловый спирт, супергидрофобные покрытия, фторсиланы, олеофобность

Для цитирования: Гидро- и олеофобные покрытия на основе поливинилового спирта и наночастиц диоксида кремния / А. Е. Соломянский [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 3. – С. 298–303. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-3-298-303>

Aleksandr E. Salamianski¹, Dariya A. Kalenchanka¹, Galina B. Melnikova²,
Yurii V. Sinkevich³, Academician Vladimir E. Agabekov¹

¹Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

²A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

³Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

HYDRO- AND OLEOPHOBIC COATINGS BASED ON POLYVINYL ALCOHOL AND SILICON DIOXIDE NANOPARTICLES

Abstract. The wettability of composite coatings based on polyvinyl alcohol (PVA) and silicon dioxide formed on silicon by the spin coating method from PVA colloid solutions of SiO₂ nanoparticles was studied. These coatings modified with hydrolysed heptadecafluorotetrahydrodecyltrimethoxysilane are found to exhibit superhydrophobic and oleophobic properties. It was found that PVA increases the wear stability of SiO₂–PVA coatings.

Keywords: silicon oxide nanoparticles, polyvinylalcohol, superhydrophobic coatings, fluorosilanes, oleophobicity

For citation: Salamianski A. E., Kalenchanka D. A., Melnikova G. B., Sinkevich Yu. V., Agabekov V. E. Hydro- and oleophobic coatings based on polyvinyl alcohol and silicon dioxide nanoparticles. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2018, vol. 62, no. 3, pp. 298–303 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-3-298-303>

Введение. Регулирование смачиваемости твердой поверхности, в частности придание ей супергидрофобных свойств (краевой угол смачивания водой больше чем 150° при гистерезисе смачивания меньше 10°), представляет интерес ввиду того, что супергидрофобные материалы устойчивы к загрязнениям, и на их основе можно создавать самоочищающиеся и не замерзающие покрытия для автомобилей, телевизионных антенн, воздушных и морских судов [1]. Эффект самоочистки поверхности («эффект лотоса») основан на «зависании» капли воды на неровностях микрорельефа с низкой поверхностной энергией. При таких условиях капля имеет квазисферическую форму и даже при минимальном наклоне скатывается с поверхности, очищая ее от грязи [1; 2]. Увеличение углов смачивания до 150° и выше достигается за счет формирования

микрорельефа с контролируемой шероховатостью поверхностного слоя и его последующей обработкой различными гидрофобизаторами на основе алкил- или фторсиланов [1–3]. Причем использование фторированных силанов позволяет получать олеофобные покрытия и материалы, краевой угол смачивания которых неполярными жидкостями, например, гексадеканом, превышает 90° [2]. Олеофобизация поверхностей предотвращает их загрязнение различными маслами, нефтью, потожировыми следами пальцев и т. п. [2; 3].

Для формирования микрорельефа на поверхности различных материалов (кремний, сталь, стекло, бетон и др.) используется метод, в основе которого лежит осаждение на подложку сферических частиц, например, из оксидов кремния и титана [3; 4]. Преимуществом данного способа является его относительная технологическая простота [1; 3]. Кроме того, возможно применение композитных составов, содержащих помимо неорганических наночастиц и полимер, который увеличивает стабильность покрытия к механическому воздействию, вследствие чего повышается его долговечность в условиях эксплуатации [1; 2].

Цель работы – создание гидро- и олеофобных износостойчивых покрытий на основе поливинилового спирта (ПВС) и наночастиц диоксида кремния. Пленки SiO_2 –ПВС могут быть использованы для создания противобледенительных и самоочищающихся поверхностей, препятствующих осаждению органических загрязнений и конденсации влаги на изделиях, эксплуатирующихся в атмосферных условиях.

Материалы и методы исследования. Покрытия SiO_2 –ПВС формировали на кремниевых пластинах методом центрифугирования [3; 5]. Предварительно кремниевые подложки прямоугольной формы площадью $\sim 1,3 \text{ см}^2$ гидрофилизировали кипячением при 70°C в течение 15 мин в смеси $\text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{SO}_4$ в соотношении по объему 1 : 3 соответственно. Затем их промывали дистиллированной водой и высушивали в токе азота. Для формирования покрытий наночастицы диоксида кремния (диаметр частиц $\sim 10 \text{ нм}$, Aldrich) диспергировали в 5 %-ном водном растворе поливинилового спирта (ПВС) с молекулярным весом ~ 145000 . Массовое соотношение SiO_2 и ПВС в полученных водных дисперсиях составляло 0,5 : 1,0; 1,0 : 1,0; 1,5 : 1,0 и 2,0 : 1,0. Затем на подложки наносили коллоид SiO_2 в ПВС и центрифугировали их со скоростью 3000 об/мин в течение 2 мин, используя высокоскоростную центрифугу (НПО «Центр», Беларусь). Формирование слоев SiO_2 –ПВС повторяли 5 раз с целью увеличения шероховатости покрытий. Полученные образцы сушили в течение 20 мин при температуре 90°C .

Для придания кремниевым подложкам и покрытиям SiO_2 –ПВС гидро- и олеофобных свойств их обрабатывали гидролизованным гептадекафтортетрагидродецилтриметоксисиланом (ГФС). Гидролиз ГФС осуществляли в изопропиловом спирте в присутствии 25 %-ного водного раствора аммиака. Затем гидролизованный ГФС сушили при давлении 10 мм рт. ст. в течение 3 ч и растворяли его в перфторпентадекане. Полученный раствор наносили на немодифицированные или модифицированные слоями SiO_2 –ПВС подложки и центрифугировали их со скоростью 3000 об/мин в течение 1 мин.

Морфологию покрытий изучали методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) на сканирующем зондовом микроскопе Nanoscope IIIA (Veeco, США). Условия сканирования: режим «прерывистого контакта», кантилевер из нитрида кремния с константой жесткости 48 Н/м, скорость сканирования – 1 Гц, плотность информации составляла 512×512 точек [6]. Шероховатость образцов, где R_a – среднеарифметическое отклонение, R_{max} – наибольшая высота профиля поверхности измеряли согласно [7] на профилометре M2 (Mahr, Германия).

Краевой угол смачивания гидро- и олеофобных покрытий определяли методом неподвижной капли по диаметру и высоте капли дистиллированной воды или гексадекана объемом 5 мкл, нанесенной на образец [8]. Выбор гексадекана для оценки олеофобности покрытий обусловлен меньшим значением его поверхностного натяжения ($18,4 \text{ мН/м}$) по сравнению с нефтью (26 мН/м) и маслами ($33\text{--}35 \text{ мН/м}$) [2]. Гистерезис смачивания образцов водой оценивали по разности значений углов натекания и оттекания, которые образуются при увеличении объема капли с 5 до 8 мкл и его последующего уменьшения до 3 мкл [1]. Изображение капель воды и гексадекана на поверхности исследуемых образцов получали с помощью цифровой оптической камеры «ЛЭМТ» (БелОМО, Беларусь). Полученные изображения анализировали при помощи специализированно-

го программного обеспечения SEM, позволяющего рассчитать углы смачивания поверхности с погрешностью $\pm 0,5^\circ$ [8]. Все операции проводили при температуре $20,0 \pm 2,0$ °С.

Триботехнические характеристики образцов в паре трения сталь (сфера)–кремний (плоскость) определяли на микротрибометре возвратно-поступательного типа, который регистрирует изменение коэффициента трения (k_f) стального индентора по образцу в зависимости от числа циклов скольжения [9]. Диаметр шарика-индентора 3 мм (марка стали 95X18), длина его хода 3 мм, линейная скорость 4 мм/с, приложенная нагрузка 0,5 Н. Абразивное изнашивание трущихся поверхностей при $k_f \sim 0,5$ являлось граничным условием проведения эксперимента [10].

Результаты и их обсуждение. Покрытия диоксида кремния, сформированные методом центрифугирования на кремниевой поверхности из коллоида SiO_2 , полученного диспергированием наночастиц SiO_2 в воде, проявляют супергидрофильные свойства (краевой угол смачивания $\sim 0^\circ$). Для увеличения износостойкости данных покрытий их формировали из коллоидов наночастиц SiO_2 в ПВС, который является высокоэффективным эмульгирующим, адгезионным и пленкообразующим полимером, а также обладает высокой прочностью на разрыв и гибкостью [11]. Модификация слоев SiO_2 –ПВС гидролизированным ГФС позволяет получить поверхности, проявляющие гидро- и олеофобные свойства, при этом необработанная часть остается гидрофильной (краевой угол смачивания водой $\sim 60^\circ$), что дает возможность создавать покрытия с чередующимися гидрофильными и гидро-, олеофобными участками. Проявление образцами гидрофобных и олеофобных свойств связано с их относительно высокой шероховатостью и наличием на поверхности олигомеров ГФС [1]. Так, шероховатость покрытия, полученного из коллоида с массовым соотношением SiO_2 и ПВС 0,5 : 1,0 составляет $R_a - 1,0$ мкм, $R_{\max} - 8,6$ мкм. При этом краевой угол смачивания данного покрытия водой и гексадеканом равен $120,8$ и $91,3^\circ$ соответственно, что выше чем для кремния, модифицированного гидролизированным ГФС $\sim 115,5$ и $90,1^\circ$. Увеличение содержания SiO_2 в покрытиях, полученных на кремнии из коллоидов с массовым соотношением SiO_2 и ПВС 1,0 : 1,0 и 1,5 : 1,0 (рис. 1), приводит к увеличению их шероховатости и составляет $R_a - 1,2$ и $2,4$ мкм, $R_{\max} - 13,5$ и $14,2$ мкм соответственно. По этой причине они проявляют супергидрофобные свойства после обработки гидролизированным ГФС – краевые углы смачивания композиционных слоев SiO_2 –ПВС с массовым соотношением компонентов 1,0 : 1,0 и 1,5 : 1,0 водой равны $151,0$ и $156,0^\circ$ соответственно (рис. 2, *a*).

Олеофобность покрытий SiO_2 –ПВС с массовым соотношением компонентов 1,0 : 1,0 и 1,5 : 1,0 также увеличивается – краевые углы смачивания гексадеканом равны $108,5$ и $130,5^\circ$ соответственно (рис. 2, *b*).

Дальнейшее увеличение содержания SiO_2 в слоях SiO_2 –ПВС приводит к уменьшению их шероховатости и краевых углов смачивания водой и гексадеканом, что, возможно, обусловлено увеличением плотности упаковки частиц SiO_2 в покрытии [1]. Шероховатость $R_a = 1,8$ мкм

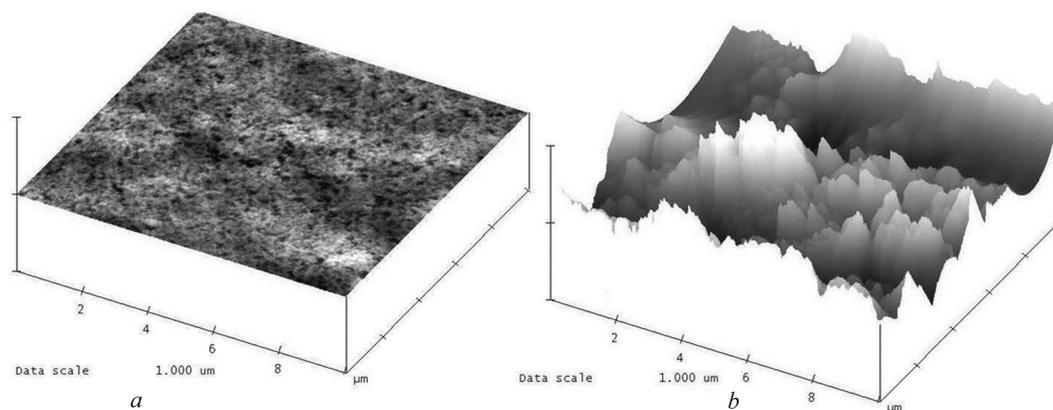


Рис. 1. АСМ изображение морфологии слоя гидролизованного ГФС (*a*) и покрытия SiO_2 –ПВС, полученного из коллоида с массовым соотношением SiO_2 и ПВС 1,5 : 1,0 (*b*)

Fig. 1. AFM image of morphology of hydrolysed heptadecafluorotetrahydrodecyltrimethoxysilane (HFS) layer (*a*) and SiO_2 –PVA coating obtained from colloid with SiO_2 and PVA mass ratio of 1.5 : 1.0 (*b*)

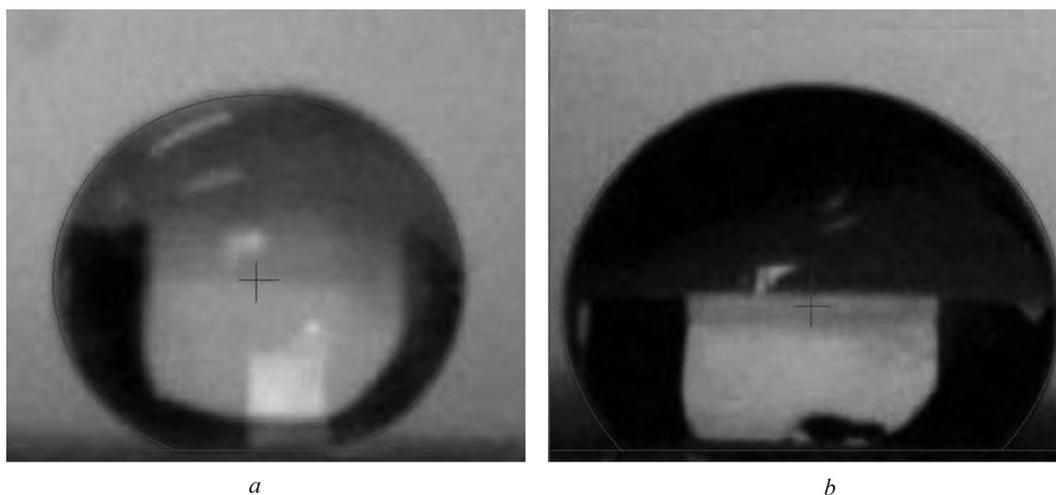


Рис. 2. Фото каплей воды (а) и гексадекана (b) на поверхности покрытия SiO_2 -ПВС, полученного из коллоида с массовым соотношением SiO_2 и ПВС 1,5 : 1,0

Fig. 2. Image of water (a) and hexadecane (b) drops on the surface of SiO_2 -PVA coating, obtained from colloid with SiO_2 and PVA mass ratio of 1.5 : 1.0

и $R_{\text{max}} = 11,0$ мкм для покрытия, полученного из коллоида с массовым соотношением SiO_2 и ПВС 2,0 : 1,0. При этом его краевые углы смачивания равны $152,5$ и $128,5^\circ$ для воды и гексадекана соответственно. Гистерезис смачивания водой покрытия SiO_2 -ПВС, полученного из раствора с оптимальным массовым соотношением компонентов 1,5 : 1,0, составляет 2° .

Следует также отметить, что ПВС увеличивает стабильность покрытий SiO_2 -ПВС к механическому воздействию стальным шариком – индентором. Так, при нагрузке 0,5 Н поверхность кремния разрушалась за один цикл скольжения (рис. 3, кривая 1), а модифицированная гидролизованным ГФС после ~60 циклов (рис. 3, кривая 2).

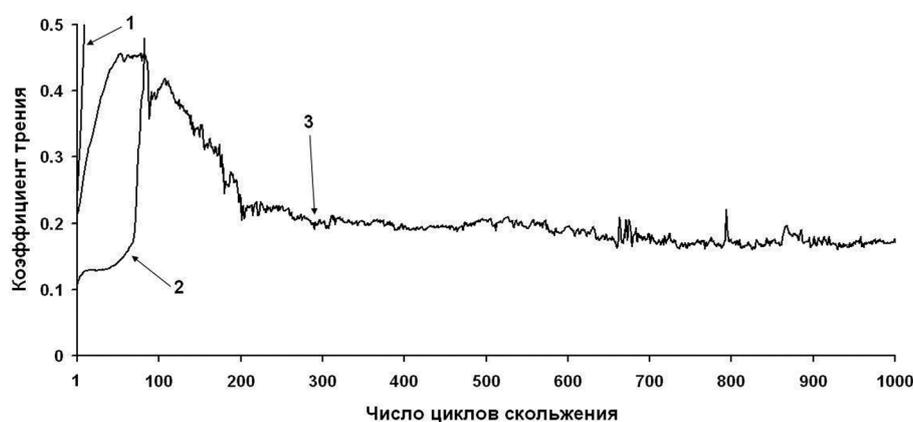


Рис. 3. Зависимость коэффициента трения от числа циклов скольжения: 1 – немодифицированный кремний, 2 – слой гидролизованного ГФС, 3 – покрытие SiO_2 -ПВС, полученное из коллоида с массовым соотношением компонентов 1,5 : 1,0 и модифицированное гидролизованным ГФС

Fig. 3. The friction coefficient as a function of number of sliding cycles: 1 – unmodified silicon surface, 2 – HFS layer, 3 – SiO_2 -PVA coating obtained from colloid with SiO_2 and PVA mass ratio of 1.5 : 1.0 and modified with HFS

Разрушение покрытия SiO_2 -ПВС, сформированного из коллоида с массовым соотношением компонентов 1,0 : 1,5, происходит после ~80 циклов, при этом частицы SiO_2 и ПВС остаются в зоне контакта поверхностей вплоть до 1000 циклов скольжения (рис. 3, кривая 3), вследствие чего абразивного изнашивания кремниевой подложки не наблюдается [8].

Закключение. Установлено, что покрытия, сформированные методом центрифугирования из водных коллоидов наночастиц диоксида кремния с поливиниловым спиртом на кремниевых по-

верхностях после обработки гидролизированным гептадекафтортетрагидродецилтриметоксисилоном, приобретают олеофобные и супергидрофобные свойства. Максимальный краевой угол смачивания водой $\sim 156,0^\circ$ при гистерезисе смачивания $\sim 2^\circ$ наблюдается для покрытия SiO_2 –ПВС, сформированного из коллоида с массовым соотношением компонентов 1,5 : 1,0. Краевой угол смачивания данного покрытия гексадеканом составляет $\sim 130,5^\circ$.

Список использованных источников

1. Boinovich, L. Principles of Design of Superhydrophobic Coatings by Deposition from Dispersions / L. Boinovich, A. Emelyanenko // *Langmuir*. – 2009. – Vol. 25, N 5. – P. 2907–2912. <https://doi.org/10.1021/la803806w>
2. Superoleophobic surfaces / J. Yong [et al.] // *Chem. Soc. Rev.* – 2017. – Vol. 46, N 14. – P. 4168–4217. <https://doi.org/10.1039/c6cs00751a>
3. Transparent, Superhydrophobic Surfaces from One-step Spin Coating of Hydrophobic Nanoparticles / L. Xu [et al.] // *Appl. Mater. Interfaces*. – 2012. – Vol. 4, N 2. – P. 1118–1125. <https://doi.org/10.1021/am201750h>
4. Transparent superhydrophobic/superhydrophilic TiO_2 -based coatings for self-cleaning and anti-fogging / Y. Lai [et al.] // *J. Mater. Chem.* – 2012. – Vol. 22, N 15. – P. 7420–7426. <https://doi.org/10.1039/c2jm16298a>
5. Tyona, M. D. A theoretical study on spin coating technique / M. D. Tyona // *Advances in Materials Research*. – 2013. – Vol. 2, N 4. – P. 195–208. <https://doi.org/10.12989/amr.2013.2.4.195>
6. Микроструктурированные покрытия на основе пленок Ленгмюра–Блоджетт для направленной фиксации бактерий *Escherichia coli* / И. В. Парибок [и др.] // *Весті Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук.* – 2014. – № 2. – С. 41–44.
7. Супергидрофобные покрытия на основе наночастиц диоксида кремния / А. Е. Саламианский [и др.] // *Докл. Нац. акад. наук Беларусі.* – 2013. – Т. 57, № 1. – С. 63–66.
8. Modeling of the process of superhydrophobic surface formation / G. B. Lisovskaya [et al.] // *Proceedings of SPIE*. – 2009. – Vol. 7377. – P. 737716-1–737716-5. <https://doi.org/10.1117/12.837073>
9. Комков, О. Ю. Микротрибометр возвратно-поступательного типа, работающий в области малых нагрузок: конструктивные особенности и методика испытания образцов / О. Ю. Комков // *Трение и износ.* – 2003. – Т. 24, № 6. – С. 642–649.
10. Salamianski, A. E. Tribological behavior of composite Langmuir–Blodgett films of triacontanoic acid / A. E. Salamianski, G. K. Zhavnerko, V. E. Agabekov // *Surface & Coatings Technology*. – 2013. – Vol. 227. – P. 62–64.
11. Lyoo, W. S. Synthesis of high-molecular-weight poly(vinyl alcohol) with high yield by novel one-batch suspension polymerization of vinyl acetate and saponification / W. S. Lyoo, H. W. Lee // *Colloid & Polym. Sci.* – 2002. – Vol. 280, N 9. – P. 835–840. <https://doi.org/10.1007/s00396-002-0691-2>

References

1. Boinovich L., Emelyanenko A. Principles of Design of Superhydrophobic Coatings by Deposition from Dispersions. *Langmuir*, 2009, vol. 25, no. 5, pp. 2907–2912. <https://doi.org/10.1021/la803806w>
2. Yong J., Chen F., Yang Q., Huo J., Hou X. Superoleophobic surfaces. *Chemical Society Reviews*, 2017, vol. 46, no. 14, pp. 4168–4217. <https://doi.org/10.1039/c6cs00751a>
3. Xu L., Karunakaran R. G., Guo J., Yang S. Transparent, Superhydrophobic Surfaces from One-step Spin Coating of Hydrophobic Nanoparticles. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2012, vol. 4, no. 2, pp. 1118–1125. <https://doi.org/10.1021/am201750h>
4. Lai Y., Tang Y., Gong J., Gong D., Chi L., Lin C., Chen Z. Transparent superhydrophobic/superhydrophilic TiO_2 -based coatings for self-cleaning and anti-fogging. *Journal of Materials Chemistry*, 2012, vol. 22, no. 15, pp. 7420–7426. <https://doi.org/10.1039/c2jm16298a>
5. Tyona M. D. A theoretical study on spin coating technique. *Advances in Materials Research*, 2013, vol. 2, no. 4, pp. 195–208. <https://doi.org/10.12989/amr.2013.2.4.195>
6. Paribok I. V., Zhavnerko G. K., Agabekov V. E., Gavrilova I. A. Patterned coatings based Langmuir–Blodgett films for regulated fixation *Escherichia coli*. *Vesti Natsyynal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2014, no. 2, pp. 41–44 (in Russian).
7. Salamianski A. E., Zhavnerko G. K., Agabekov V. E., Sinkevich Y. V. Superhydrophobic coatings from nanoparticles of silicon dioxide. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2013, vol. 57, no. 1, pp. 63–66 (in Russian).
8. Lisovskaya G. B., Chizhik S. A., Salamianski A. E., Agabekov V. E., Zhavnerko G. K. Modeling of the process of superhydrophobic surface formation. *Proceedings of SPIE*, 2009, vol. 7377, pp. 737716-1–737716-5. <https://doi.org/10.1117/12.837073>
9. Komkov O. Yu. A reciprocating type microtribometer operating within a range of light loads: design features and methods of tests of specimens. *Trenie i iznos = Journal of Friction and Wear*, 2003, vol. 24, no. 6, pp. 642–649 (in Russian).
10. Salamianski A. E., Zhavnerko G. K., Agabekov V. E. Tribological behavior of composite Langmuir–Blodgett films of triacontanoic acid. *Surface & Coatings Technology*, 2013, vol. 227, pp. 62–64. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.02.024>
11. Lyoo W. S., Lee H. W. Synthesis of high-molecular-weight poly(vinyl alcohol) with high yield by novel one-batch suspension polymerization of vinyl acetate and saponification. *Colloid & Polymer Science*, 2002, vol. 280, no. 9, pp. 835–840. <https://doi.org/10.1007/s00396-002-0691-2>

Информация об авторах

Соломянский Александр Ефимович – канд. хим. наук, ст. науч. сотрудник. Институт химии новых материалов НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 36, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: solasy@mail.ru.

Коленченко Дарья Александровна – стажер. Институт химии новых материалов НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 36, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: daria.korzun@mail.ru.

Мельникова Галина Борисовна – 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: galachkax@gmail.com.

Синькевич Юрий Владимирович – д-р техн. наук, профессор. Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: solasy@gmail.com.

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: agabekov@ichnm.basnet.by.

Information about the authors

Salamianski Aleksandr Efimovich – Ph. D. (Chemistry), Senior 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: solasy@mail.ru.

Kalenchanka Dariya Aleksandrovna – Trainee. 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: daria.korzun@mail.ru.

Melnikova Galina Borisovna – 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: galachkax@gmail.com.

Sinkevich Yurii Vladimirovich – D. Sc. (Engineering), Professor. Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: solasy@gmail.com.

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: agabekov@ichnm.basnet.by.

БИОЛОГИЯ**BIOLOGY**

УДК 543.841.8:556.55.(212)

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-3-304-310>

Поступило в редакцию 11.05.2018

Received 11.05.2018

Ж. Ф. Бусева¹, Ш. Б. Газерани Фарахани¹, Ю. К. Верес², А. А. Колмакова³, Н. Н. Сущик³

¹Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по биоресурсам,
Минск, Республика Беларусь

²Нарочанская биологическая станция им. Г. Г. Винберга, Нарочь, Республика Беларусь

³Институт биофизики Сибирского отделения Российской академии наук,
Красноярск, Российская Федерация

**СТЕХИОМЕТРИЧЕСКИЙ СОСТАВ СЕСТОНА В ЛИТОРАЛИ И ПЕЛАГИАЛИ
МЕЛКОВОДНОГО ОЗЕРА ОБСТЕРНО (БЕЛАРУСЬ)**

(Представлено членом-корреспондентом В. П. Семенченко)

Аннотация. Исследовали элементный состав (С, N, P) и соотношение данных элементов в литорали и пелагиали мелководного мезотрофного озера Обстерно летом и осенью, а также влияние зарослей макрофитов на стехиометрию сестона. В пелагиали и литорали летом соотношение С : N было низким, 4,62 и 7,05 соответственно, однако незначительно увеличивалось осенью – 5,66 в пелагиали против 8,33 в литорали. Высокие значения N : P и низкое содержание фосфора, особенно в литоральной зоне летом (57,7 в июле и 22,47 в сентябре) указывают на высокий уровень ограничения по фосфору в литоральной зоне. Данные о стехиометрии сестона литоральных местообитаний получены впервые и, как показано в данном исследовании, они значительно выше классического соотношения Рэдфилда. Таким образом, основные биогенные элементы – азот и фосфор в биотопах с зарослями макрофитов летом находятся в большем дефиците, чем в пелагиали, что, как мы считаем, может быть вызвано несколькими причинами: конкуренцией между макрофитами и фитопланктоном за биогенные вещества, низким качеством пищи, низкой численностью зоопланктона, а также его бедным таксон-специфичным элементным соотношением в летний сезон.

Ключевые слова: сестон, углерод, азот, фосфор, стехиометрия, литораль, макрофиты, пелагиаль

Для цитирования: Стехиометрический состав сестона в литорали и пелагиали мелководного озера Обстерно (Беларусь) / Ж. Ф. Бусева [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 3. – С. 304–310. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-3-304-310>

**Zhanna F. Buseva¹, Shabnam Bahman Gazerani Farahani¹, Yulia K. Veras²,
Anzhelika A. Kolmakova³, Nadezhda N. Sushchik³**

¹Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Bioresources,
Minsk, Republic of Belarus

²Naroch biological station named after G. G. Vinberg, Naroch, Republic of Belarus

³Institute of Biophysics Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russian Federation

**STOICHIOMETRIC COMPOSITION OF SESTON IN LITTORAL
AND PELAGIAL ZONES OF SHALLOW LAKE OBSTERNO (BELARUS)**

(Communicated by Corresponding Member Vitaliy P. Semenchenko)

Abstract. We estimated the seston elemental composition (C, N, P) and its ratio in pelagic and littoral zones of mesotrophic shallow Lake Obsterno during two contrasting seasons, as well as the influence of macrophyte beds on the seston stoichiometry. In the both pelagial and littoral zones in summer the C : N ratio was small, 4.62 and 7.05 respectively. But it increased slightly during autumn to 5.66 in pelagic samples against 8.33 in littoral ones. The large N : P ratio and the small phosphorus content specially in the macrophyte covered littoral zone equal to 57.7 in July against 22.47 in September suggest a high level of phosphorus limitation in the littoral locations as a possible mediated reason suppressing zooplankton abundance in summer. Our results in the both pelagial and littoral habitat showed a highly P limited situation in which the N : P ratio was larger

in littoral with macrophyte than in pelagial zones. The obtained data of littoral seston stoichiometry were recorded for the first time and exceeded the classical Redfield ratio. The elemental imbalance between macrophyte covered littoral and pelagial suggest that nutrients, especially P, are more limiting in macrophyte beds in summer due to the resource competition between phytoplankton and macrophytes for nutrients, a poor food quality, low zooplankton abundance, as well as its poor taxon-specific elemental ratio in summer.

Keywords: seston, carbon, nitrogen, phosphorus, stoichiometry, littoral, pelagial, macrophyte beds

For citation: Buseva Zh. F., Gazerani Farahani Sh. B., Veras Yu. K., Kolmakova A. A., Sushchik N. N. Stoichiometric composition of seston in littoral and pelagial zones of shallow lake Obsterno (Belarus). *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2018, vol. 62, no. 3, pp. 304–310 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-3-304-310>

Введение. Организмы различаются по доле основных элементов, из которых они состоят, некоторые из них, например азот и фосфор, являются очень подвижными и относятся к элементам, которые в большинстве случаев лимитируют развитие биоты и в целом продукцию водных экосистем. Биохимический состав взвешенного органического вещества в пресноводных экосистемах является индикаторным показателем роста и развития водных организмов, составляющих живую фракцию сестона – фито-, бактерио- и зоопланктона [1; 2], основных компонентов пищевой сети в водоемах. Экологическая стехиометрия с точки зрения качества пищи является наиболее доступным и понятным инструментом для оценки взвешенного вещества, отражает ценность того или иного водного объекта как поставщика органического вещества, которое участвует, прежде всего, в круговороте углерода, других элементов, а также в большом количестве депонируется в пределах водного объекта. Исторически сложилось, что соотношение Рэдфилда $C_{106} : N_{16} : P_1$ считается эталонным и используется для количественной оценки взвешенного вещества в водных экосистемах [3], однако установлено, что данное соотношение в озерных экосистемах находится в более широких пределах, по сравнению с морскими экосистемами и мировым океаном, для которого оно было впервые установлено. Между тем, исследований по данной проблеме в литорали озер, по-видимому, не проводилось вообще, поскольку мы не нашли данных в доступной мировой литературе. Аллохтонная органика, поступающая различными путями в водоем, является дополнительным источником азота и фосфора для автохтонной, поскольку развитие и рост планктонных организмов лимитируются в основном этими двумя элементами. Литоральная водная растительность выступает барьером для поступления аллохтонного вещества с водосбора в водоем, перехватывая биогенные вещества и конкурируя с фитопланктоном за их потребление, таким образом, оказывая влияние на состав и структуру литоральных сообществ продуцентов и первичных консументов – зоопланктона. Целью нашего исследования было изучение элементного состава сестона в литорали и пелагиали модельного мезотрофного озера, а также влияние биотопического фактора на стехиометрическое соотношение биогенных элементов в сестоне.

Материалы и методы исследования. Отбор проб проводился в течение вегетационного сезона 2016 г. (май–сентябрь) в литоральной и пелагической зонах мезотрофного мелководного озера Обстерно (северо-запад Беларуси). Озеро имеет площадь 9,89 км², средняя глубина – 5,3 м, прозрачность в летние месяцы по диску Секки – 4,5 м. Для озера характерна широкая (50–150 м), опоясывающая по периметру, полоса макрофитов. Обследовали три типа литорали: литораль без зарослей (чистая литораль), литораль с зарослями камыша озерного (*Schoenoplectus lacustris*) и кубышки желтой (*Nuphar lutea*). Анализировали фракцию сестона >100 мкм, которая содержит зоопланктон, соответствующую фракцию фитопланктона и детрит. Отбор проб проводился общепринятыми гидробиологическими методами с помощью буксировочной сети Джеди (размер ячеи 100 мкм), протягиванием от дна до поверхности. Пробы для анализа на углерод, азот и фосфор фильтровали в лаборатории в течение 2–3 ч после отбора. Использовали фильтры GF/F MicroBio, размер пор 0,7 мкм, предварительно прокаленные в муфельной печи при 400 °С в течение 16 ч. После фильтрации фильтры сушили при температуре 55–60 °С в течение 72 ч, затем взвешивали и до проведения анализа хранили в холодильнике. Анализ проб на содержание углерода и азота проводили на CHN анализаторе Flash EA 1112 NC Soil/MAS 200, ThermoQuest, Italy, анализ на содержание фосфора – с помощью метода мокрого сжигания с персульфатом, количество оценивали колориметрически ($\lambda = 882 \text{ nm}$)¹. Содержание элементов (C, N, P) рассчитывали на 1 мг сухой

¹ Методы гидробиологических исследований основных биогенных элементов / Всесоюзный науч.-исслед. ин-т мор. рыб. х-ва и океанографии; исп. В. В. Сапожников [и др.]. – Москва: ВНИРО, 1988. – 119 с.

массы, использовали их молярные соотношения. Статистический анализ был проведен с помощью программ Excel и Statistica 16.0, Shapiro-Wilk test – для определения нормальности распределения количественных данных, однофакторный анализ ANOVA с Tukey test использовали для достоверности различия количественного содержания элементов в различных биотопах.

Результаты и их обсуждение. Летний и осенний периоды в изученном водоеме характеризуются разным уровнем и степенью развития водной растительности в литоральной зоне, а также разным уровнем развития и доминированием различных видов фито- и зоопланктона. В целом в озерах умеренного климата изменения в содержании фосфора зависят от сезонных изменений в составе планктонных сообществ. При сравнении соотношений основных элементов C : N, C : P и N : P в зоопланктоне и в его пище отмечается, что зоопланктон имеет более высокое соотношение осенью по сравнению с летом. Также установлено, что в гипертрофных, эвтрофных и мелководных озерах регистрировались такие соотношения элементов, которые были выше по сравнению со стандартным соотношением Рэдфилда [4]. Также содержание углерода в пище зоопланктона (фитопланктоне) осенью выше, чем летом [5]. Как показали результаты наших исследований, содержание углерода в целом пуле сестона осенью выше, чем летом во всех биотопах, содержание его в чистой литорали статистически отличается от такового в других биотопах (таблица), что согласуется с данными предшествующих исследований. Когда соотношение C : P в сестоне более 370, пищи недостаточно для фильтраторов, особенно для кладоцер, и, как результат, биомасса кладоцер снижается, по нашим данным, именно такое состояние сообществ характерно для сообществ чистой литорали и камыша в июле.

Содержание основных биогенных элементов углерода, азота и фосфора (средние значения, микромоляр, (мкМ)) и их соотношения (на основе средних концентраций элементов) в сестоне фракции >100 мкм в литорали и пелагиали оз. Обстерно

Analysis of variance and grouping information using Tukey test for carbon, nitrogen and phosphorus content (means, micromoles (μM)) of seston >100 μm and molar ratios in pelagial and littoral Lake Obsterno

Биотоп Biotope	Месяц Month	C, мкМ	N, мкМ	P, мкМ	C : N	N : P	C : P
Пелагиаль	сентябрь	6,15 ^B	1,08 ^A	0,13 ^A	5,66	8,00	45,40
Камыш	сентябрь	5,33 ^B	0,64 ^B	0,04 ^B	8,24	13,56	111,77
Кубышка	сентябрь	8,13 ^A	0,92 ^A	0,02 ^{BC}	8,75	31,38	274,75
Ч. литораль	сентябрь	1,57 ^{CD}	0,21 ^{DE}	нд	7,41	нд	нд
Пелагиаль	июль	2,36 ^C	0,51 ^{BC}	0,01 ^{BC}	4,62	25,97	120,20
Камыш	июль	2,37 ^C	0,28 ^{CDE}	0,003 ^C	8,46	79,67	674,04
Кубышка	июль	2,44 ^C	0,37 ^{CD}	0,009 ^C	6,46	40,47	261,64
Ч. литораль	июль	0,67 ^D	0,10 ^E	0,002 ^C	6,23	52,99	330,45

Примечания: разными буквами для каждого элемента (C, N, P) обозначены значения, которые статистически различаются в результате сравнения по Tukey test. Для углерода $df = 7$, $F = 97,95$, $p = 0,000$, для азота $df = 7$, $F = 62,35$, $p = 0,000$, для фосфора $df = 7$, $F = 56,00$, $p = 0,000$; нд – нет данных из-за очень низкого содержания фосфора, которое было ниже возможного порога определения.

Note: Means for (C, N, P) that don't share a same letter are significantly different from each other after Tukey test at $p \leq 0.05$. For carbon content $df = 7$, $F = 97.95$, $p = 0.000$, for nitrogen $df = 7$, $F = 62.35$, $p = 0.000$, for phosphorus $df = 7$, $F = 56.00$, $p = 0.000$; нд – no data because of low level of phosphorus content which was under detection.

Увеличение доли детрита в сестоне по данным [6] увеличивало соотношение C : P весной и летом, поскольку обусловленное ветром перемешивание считается главной причиной ресуспензии детрита из седиментов в мелководных водоемах. Ветровое перемешивание в литорали, несомненно, может быть одной из причин увеличения данного соотношения в литорали оз. Обстерно летом. Численность зоопланктона в июле была низкой в Обстерно, особенно таких видов, как *Daphnia* spp. и *Bosmina* spp. при высоком соотношении C : P в сестоне.

В то же время когда хищничество рыб является фактором, снижающим численность крупных зоопланктеров летом, и особенно *Daphnia* spp., очень высокое соотношение в сестоне C : P ~ 250 в зарослях макрофитов, может, несомненно, создавать дополнительное ограничение

для Р-требовательных видов, таких как *Daphnia* spp. и *Diaphanosoma* spp., которые практически отсутствовали в составе сообществ в данный период наблюдений, что находится в полном соответствии с данными наших наблюдений о состоянии сообществ мальков рыб. С другой стороны, *Bosmina* spp. менее требовательная к фосфору и с меньшей чувствительностью к хищничеству рыб, имеет двойное преимущество. При сравнении величин по численности зоопланктона в наших исследованиях, в частности в пелагиали в течение лета со значениями с высоким таксон-специфичным С : Р соотношением, такими как каляноидные копеподы [1] и низким таксон-специфичным С : Р (*Daphnia*), мы получаем соответствие наших результатов с данными предыдущих исследований.

Диапазон значений для зоопланктона (сестон >100 мкм) почти идеально соответствует значениям для видов с высоким и низким соотношением С : Р. Как показали наши исследования, летом крупноразмерный зоопланктон, такой как *Daphnia* spp. исчезает из планктона оз. Обстерно (наши неопубликованные данные), и сообщество *Copepoda* имеет бóльшую численность, чем *Cladocera*. Наши данные в этом отношении хорошо согласуются с тем, что состав зоопланктона и его потенциальный вклад в биохимическое содержание изменчивости сестона доказаны многими предыдущими исследованиями. Так, согласно исследованиям, описанным в упомянутой выше работе [1], наиболее высокое соотношение С : Р в зоопланктоне имеют каланоидные копеподы, однако, этот таксон имеет высокое С : Р соотношение на взрослых стадиях. Соотношение С : Р в сестоне по отдельным данным, приведенным в [6], варьировало с ~50 до ~500, соотношение N : Р варьировало от ~5 до ~50 и С : N от ~5,5 до ~40. Они показали, что в течение лета соотношение С : Р в сестоне превышает соотношение 106 Рэдфилда во всех биотопах и на всех глубинах. В наших исследованиях летние соотношения С : Р в сестоне практически во всех случаях превышают 106, а в некоторых >600 (таблица), но соотношения С : N и N : Р были близки к результатам, полученным в [7]. Согласно данным, полученным в настоящем исследовании, соотношение N : Р подобно соотношению С : Р превышало соотношение Рэдфилда в литорали и одинажды в пелагиали. Оба соотношения С : Р и N : Р в сестоне считаются диагностическими для лимитирования фосфором, а С : N считаются диагностическими для лимитирования азотом [8]. Согласно данным [6], когда соотношение N : Р в сестоне превышает 22, водоем считается лимитированным по фосфору. Результаты наших исследований показывают условия высокого дефицита фосфора в озере Обстерно как в пелагиали, так и в литорали, при которых значения N : Р в литорали значительно выше, чем в пелагиали. В приведенных выше исследованиях авторы также утверждают, что при серьезном дефиците фосфора соотношение С : Р в сестоне превышает 258. Дефицит фосфора в озерах может возникать из-за структурных показателей сообщества, например, из-за видов мелких размеров и низкой биомассы первичных продуцентов [7], а также присутствия крупных хищных рыб на верхних трофических уровнях. Длина пищевой цепи и множество ступеней в трофической пирамиде также могут приводить к дефициту фосфора [9]. По нашим данным, в литорали оз. Обстерно существует более длинная трофическая цепь, по сравнению с пелагической зоной, во-первых, из-за более высокого разнообразия в сообществах макрозообентоса, во-вторых, из-за использования литоральных местообитаний с макрофитами рыбами для нереста и нагула в них молоди рыб. С увеличением численности зоопланктона С и N увеличивается относительно Р. По данным [4], было показано, что, как правило, эти соотношения сильно варьируют в небольших мелких озерах. Зоопланктон может значительно влиять на изменение фитопланктонных сообществ посредством селективного выедания, пищеварения и выделения, и это может измениться в зависимости от состава сообщества [10]. Согласно данным [11] по результатам исследований 34 озер умеренного и арктического регионов, соотношение в сестоне варьировало в следующих пределах: С : N 8,8–9,1, С : Р 122–210 и N : Р 13,9–23,3 и было выше в умеренных озерах, чем в арктических на протяжении целого сезона. В отличие от данных вышеупомянутых авторов, мы получили в некоторых случаях значительно более высокие значения для пелагического сестона летом, но наши средние данные по сезону соотношения С : N (С : N = 8) для пелагического и литорального сестона согласуются с результатами упомянутого исследования.

В соответствии со стехиометрической теорией относительная численность каланоидных копепод хорошо коррелирует с соотношением С : N в сестоне в умеренных озерах. В обеих – пела-

гиальной и литоральной зонах оз. Обостерно отношение $C : N$ было выше осенью из-за более высокой численности каляноидных копепоид. Более высокое соотношение $C : N$ сестона в литорали летом и осенью может быть причиной большего содержания детрита в прибрежных биотопах, особенно осенью (причины – отмирание водной растительности и ассоциированного с ним пеллифитона), тогда же там появились в большем количестве виды-детритофаги. Эти результаты свидетельствуют о том, что элементный дисбаланс между литоралью, покрытой макрофитами, и пелагиалью предполагает, что питательные вещества, особенно P , потенциально более ограничивают продукцию зоопланктона в изучаемом умеренном озере. Соотношение $N : P$ в сестоне (>100 мкм) равнялось, по нашим расчетам, для пелагической зоны ~ 25 и 8 летом и осенью соответственно (таблица), но было гораздо больше в прибрежных биотопах, что указывает на то, что сообществам зоопланктона в обоих местообитаниях не обеспечена одинаковая доступность питательных веществ для первичных продуцентов. Высокое соотношение $N : P$ и низкое содержание фосфора, особенно в литорали, позволяет делать вывод о том, что зоопланктон может поглощать азот и перемещать отношение $N : P$ к большим значениям и приводить к ограничению P в фитопланктоне. Согласно ответной реакции зоопланктона на изменение качества пищи [12–14], изменение и замещение одних видов другими в сообществе зоопланктона происходит посредством изменения качества пищи.

Систематические изменения в стехиометрии сестона в изучаемом озере, вероятно, отражают сезонную динамику и структуру доминирующих видов зоопланктона и фитопланктона, а различия элементного состава в сообществе зоопланктона напрямую влияют на рециркуляцию фосфора в экосистеме. Сдвиги и изменения в составе сообщества зоопланктона, в частности, соотношение между доминированием дафниид и копепоид, могут вызывать сдвиг в элементарном соотношении на уровне сообщества [1; 15]. Частично это может быть связано с тем, что богатые фосфором кладоцеры, такие как *Daphnia* и *Diaphanosoma*, были редкими или отсутствовали летом, в то время как было полное доминирование относительно бедной фосфором *Bosmina*, которая не сильно отличается от копепоид по соотношению $C : P$ [1; 16]. В данном исследовании мы не ставили целью продемонстрировать какую-либо причинную связь между составом сообщества и соотношениями $C : P$ или $N : P$ на уровне сообществ зоопланктона, однако полученные нами данные могут быть использованы для последующего анализа такого рода.

Заключение. Результаты нашего исследования показали, что в пелагической зоне мезотрофного озера величины удельного содержания биогенных элементов в сестоне согласуются с данными, полученными ранее для пресноводных озер мира, и их молярные соотношения несколько выше классического соотношения Рэдфилда. Данные, полученные для литоральных биотопов, показали, что содержание основных биохимических элементов в сестоне в литоральных биотопах значительно отличается от содержания таковых в пелагиали, а соотношения элементов в литорали с зарослями макрофитов летом имеют более высокие значения для $N : P$ и $C : P$, что указывает на сильный недостаток фосфора в сестоне. Таким образом, основные ключевые биогенные элементы – азот и, особенно фосфор, в биотопах с зарослями макрофитов летом находятся в большем дефиците, чем в пелагиали, что может быть вызвано несколькими причинами: конкуренцией между макрофитами и фитопланктоном за биогенные вещества, низким качеством пищи, низкой численностью зоопланктона, а также его бедным таксон-специфичным элементным соотношением в летний сезон.

Благодарности. Работа выполнена при частичной поддержке БРФФИ (грант № Б17-037). Авторы благодарят директора Нарочанской биостанции им. Г. Г. Винберга д-ра биол. наук Т. В. Жукову за предоставленную возможность использования оборудования для проведения химического элементного анализа, сотрудников данной биостанции Е. И. Лапицкую и Э. А. Журавлеву за помощь при проведении анализа.

Acknowledgements. This work was partially supported by the BRFFR (grant No. B17-037). We thank for the collaboration with Narach Biological Station of Belarusian State University and thank it's Director Dr. T. V. Zhukova, scientific and technological staff – E. I. Lapitskaja and E. A. Zhuravliova for their fruitful help.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Andersen, T. Carbon, nitrogen, and phosphorus content of freshwater zooplankton / T. Andersen, D. O. Hessen // *Limnology and Oceanography*. – 1991. – Vol. 36, N 4. – P. 807–814. <https://doi.org/10.4319/lo.1991.36.4.0807>
2. Hecky, R. E. The stoichiometry of carbon, nitrogen, and phosphorus in particulate matter of lakes and oceans / R. E. Hecky, P. Campbell, L. L. Hendzel // *Limnology and Oceanography*. – 1993. – Vol. 38, N 4. – P. 709–724. <https://doi.org/10.4319/lo.1993.38.4.0709>
3. Redfield, A. C. The biological control of chemical factors in the environment / A. C. Redfield // *American Scientist*. – 1958. – Vol. 46. – P. 205–221.
4. Scale-dependent carbon:nitrogen:phosphorus seston stoichiometry in marine and freshwaters / R. W. Sterner [et al.] // *Limnology and Oceanography*. – 2008. – Vol. 53, N 3. – P. 1169–1180. <https://doi.org/10.4319/lo.2008.53.3.1169>
5. Otten, J. H. Dynamics of phytoplankton detritus in a shallow, eutrophic lake (Lake Loosdrecht, The Netherlands) / J. H. Otten, H. J. Gons, M. Rijkeboer // *Hydrobiologia*. – 1992. – Vol. 233, N 1–3. – P. 61–68. <https://doi.org/10.1007/bf00016096>
6. Sterner, R. W. Zooplankton nutrition: recent progress and a reality check / R. W. Sterner, K. L. Schulz // *Aquatic Ecology*. – 1998. – Vol. 32, N 4. – P. 261–279. <https://doi.org/10.1023/a:1009949400573>
7. Sterner, R. W. In situ-measured primary production in Lake Superior / R. W. Sterner // *Journal of Great Lakes Research*. – 2010. – Vol. 36, N 1. – P. 139–149. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2009.12.007>
8. Guildford, S. J. Total Nitrogen, Total Phosphorus and Nutrient Limitation in Lakes and Oceans: Is There a Common Relationship? / S. J. Guildford, R. E. Hecky // *Limnology and Oceanography*. – 2000. – Vol. 45, N 6. – P. 1213–1223. <https://doi.org/10.4319/lo.2000.45.6.1213>
9. Trophic-level interpretation based on $\delta^{15}\text{N}$ values: implication of tissue-specific fractionation and amino acid composition / K. Schmidt [et al.] // *Marine Ecology Progress Series*. – 2004. – Vol. 266. – P. 43–58. <https://doi.org/10.3354/meps266043>
10. Urabe, J. Direct and indirect effects of zooplankton on seston stoichiometry / J. Urabe // *Ecoscience*. – 1995. – Vol. 2, N 3. – P. 286–296. <https://doi.org/10.1080/11956860.1995.11682296>
11. Dobberfuhl, D. R. Use of dried algae as a food source for zooplankton growth and nutrient release experiments / D. R. Dobberfuhl, J. J. Elser // *Journal of Plankton Research*. – 1999. – Vol. 21, N 5. – P. 957–970. <https://doi.org/10.1093/plankt/21.5.957>
12. Urabe, J. Possibility of N or P limitation for planktonic cladocerans: An experimental test / J. Urabe, Y. Watanabe // *Limnology and Oceanography*. – 1992. – Vol. 37, N 2. – P. 244–251. <https://doi.org/10.4319/lo.1992.37.2.0244>
13. Phytoplankton nutrient limitation and food quality for *Daphnia* / R. W. Sterner [et al.] // *Limnology and Oceanography*. – 1993. – Vol. 38, N 4. – P. 857–871. <https://doi.org/10.4319/lo.1993.38.4.0857>
14. DeMott, W. R. Utilization of a cyanobacterium and a phosphorus-deficient green alga as complementary resources by daphnids / W. R. DeMott // *Ecology*. – 1998. – Vol. 79, N 7. – P. 2463–2481. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(1998\)079\[2463:uoacaa\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(1998)079[2463:uoacaa]2.0.co;2)
15. Elser, J. J. A stoichiometric analysis of zooplankton-phytoplankton interactions in marine and freshwater ecosystems / J. J. Elser, R. I. Hassett // *Nature*. – 1994. – Vol. 370. – P. 211–213. <https://doi.org/10.1038/370211a0>
16. Hessen, D. O. Factors determining the nutritive status and production of zooplankton in humic lake / D. O. Hessen // *Journal of Plankton Research*. – 1989. – Vol. 11, N 4. – P. 649–664. <https://doi.org/10.1093/plankt/11.4.649>

References

1. Andersen T., Hessen D. O. Carbon, nitrogen, and phosphorus content of freshwater zooplankton. *Limnology and Oceanography*, 1991, vol. 36, no. 4, pp. 807–814. <https://doi.org/10.4319/lo.1991.36.4.0807>
2. Hecky R. E., Campbell P., Hendzel L. L. The stoichiometry of carbon, nitrogen, and phosphorus in particulate matter of lakes and oceans. *Limnology and Oceanography*, 1993, vol. 38, no. 4, pp. 709–724. <https://doi.org/10.4319/lo.1993.38.4.0709>
3. Redfield A. C. The biological control of chemical factors in the environment. *American Scientist*. 1958, vol. 46, pp. 205–221.
4. Sterner R. W., Andersen T., Elser J. J., Hessen D. O., Hood J. M., Mccauley E., Urabe J. Scale-dependent carbon:nitrogen:phosphorus seston stoichiometry in marine and freshwaters. *Limnology and Oceanography*, 2008, vol. 53, no. 3, pp. 1169–1180. <https://doi.org/10.4319/lo.2008.53.3.1169>
5. Otten J. H., Gons H. J., Rijkeboer M. Dynamics of phytoplankton detritus in a shallow, eutrophic lake (Lake Loosdrecht, The Netherlands). *Hydrobiologia*, 1992, vol. 233, no. 1–3, pp. 61–68. <https://doi.org/10.1007/bf00016096>
6. Sterner R. W., Schulz K. L. Zooplankton nutrition: recent progress and a reality check. *Aquatic Ecology*, 1998, vol. 32, no. 4, pp. 261–279. <https://doi.org/10.1023/a:1009949400573>
7. Sterner R. W. In situ-measured primary production in Lake Superior. *Journal of Great Lakes Research*, 2010, vol. 36, no. 1, pp. 139–149. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2009.12.007>
8. Guildford S. J., Hecky R. E. Total Nitrogen, Total Phosphorus and Nutrient Limitation in Lakes and Oceans: Is There a Common Relationship? *Limnology and Oceanography*, 2000, vol. 45, no. 6, pp. 1213–1223. <https://doi.org/10.4319/lo.2000.45.6.1213>
9. Schmidt K., McClelland J. M., Mente E., Montoya J. P., Atkinson A., Voss M. Trophic-level interpretation based on $\delta^{15}\text{N}$ values: implication of tissue-specific fractionation and amino acid composition. *Marine Ecology Progress Series*, 2004, vol. 266, pp. 43–58. <https://doi.org/10.3354/meps266043>
10. Urabe J. Direct and indirect effects of zooplankton on seston stoichiometry. *Ecoscience*, 1995, vol. 2, no. 3, pp. 286–296. <https://doi.org/10.1080/11956860.1995.11682296>

11. Dobberfuhl D. R., Elser J. J. Use of dried algae as a food source for zooplankton growth and nutrient release experiments. *Journal of Plankton Research*, 1999, vol. 21, no. 5, pp. 957–970. <https://doi.org/10.1093/plankt/21.5.957>
12. Urabe J., Watanabe Y. Possibility of N or P limitation for planktonic cladocerans: An experimental test. *Limnology and Oceanography*, 1992, vol. 37, no. 2, pp. 244–251. <https://doi.org/10.4319/lo.1992.37.2.0244>
13. Sterner R. W., Hagemeyer D. D., Smith W. L., Smith R. F. Phytoplankton nutrient limitation and food quality for *Daphnia*. *Limnology and Oceanography*, 1993, vol. 38, no. 4, pp. 857–871. <https://doi.org/10.4319/lo.1993.38.4.0857>
14. DeMott W. R. Utilization of a cyanobacterium and a phosphorus-deficient green alga as complementary resources by daphnids. *Ecology*, 1998, vol. 79, no. 7, pp. 2463–2481. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(1998\)079\[2463:uoacaa\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(1998)079[2463:uoacaa]2.0.co;2)
15. Elser J. J., Hassett R. I. A stoichiometric analysis of zooplankton-phytoplankton interactions in marine and freshwater ecosystems. *Nature*, 1994, vol. 370, pp. 211–213. <https://doi.org/10.1038/370211a0>
16. Hessen D. O. Factors determining the nutritive status and production of zooplankton in humic lake. *Journal of Plankton Research*, 1989, vol. 11, no. 4, pp. 649–664. <https://doi.org/10.1093/plankt/11.4.649>

Информация об авторах

Бусева Жанна Федоровна – канд. биол. наук, вед. науч. сотрудник. Научно-практический центр НАН Беларуси по биоресурсам (ул. Академическая, 27, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: buseva_j@mail.ru.

Газерани Фарахани Шабнам Бахман – мл. науч. сотрудник. Научно-практический центр НАН Беларуси по биоресурсам (ул. Академическая, 27, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: sh.farahani1986@gmail.com.

Верес Юлия Константиновна – канд. биол. наук, вед. лаборант. Нарочанская биологическая станция им. Г. Г. Винберга (220095, к. п. Нарочь, Мядельский р-н, Минская обл., Республика Беларусь). E-mail: veres.julia.naroch@gmail.com.

Колмакова Анжелика Александровна – канд. биол. наук, науч. сотрудник. Институт биофизики Сибирского отделения Российской академии наук (ул. Академгородок, 50/50, 660036, Красноярск, Российская Федерация). E-mail: angelika_@inbox.ru.

Суцик Надежда Николаевна – д-р биол. наук., вед. науч. сотрудник, заместитель директора. Институт биофизики Сибирского отделения Российской академии наук (ул. Академгородок, 50/50, 660036, Красноярск, Российская Федерация). E-mail: labehe@ibp.ru.

Information about authors

Buseva Zhanna Fedorovna – Ph. D. (Biology), Leading researcher. Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Bioresources (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: buseva_j@mail.ru.

Gazerani Farahani Shabnam Bahman – Junior researcher. Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Bioresources (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sh.farahani1986@gmail.com.

Veras Yulia Konstantinovna – Ph. D. (Biology), Leading laboratory assistant. Naroch biological station named after G. G. Vinberg (220095, v. Naroch, Miel district, Minsk region, Republic of Belarus). E-mail: veres.julia.naroch@gmail.com.

Kolmakova Anzhelika Aleksandrovna – Ph. D. (Biology), Researcher. Institute of Biophysics Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (50/50, Akademgorodok Str., 660036, Krasnoyarsk, Russian Federation). E-mail: angelika_@inbox.ru.

Sushchik Nadezhda Nikolaevna – D. Sc. (Biology), Leading researcher, Deputy Director. Institute of Biophysics Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (50/50, Akademgorodok Str., 660036, Krasnoyarsk, Russian Federation). E-mail: labehe@ibp.ru.

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

МЕДИЦИНА
MEDICINE

УДК 617.5-089.844
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-3-311-321>

Поступило в редакцию 11.05.2018
Received 11.05.2018

О. А. Даниленко¹, Е. Р. Макаревич², член-корреспондент Н. С. Сердюченко³

¹*Минский городской клинический центр травматологии и ортопедии, Минск, Республика Беларусь*

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

³*Национальная академия наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь*

**ХИРУРГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К УСТРАНЕНИЮ ХРОНИЧЕСКОЙ
ПОСТТРАВМАТИЧЕСКОЙ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ПЛЕЧЕВОГО СУСТАВА**

Аннотация. Изучены результаты лечения 290 пациентов с хронической посттравматической нестабильностью плечевого сустава, пролеченных в 2004–2017 гг. В соответствии с поставленной задачей авторами выделены 3 клинических варианта посттравматической нестабильности в зависимости от превалирующего направления дислокации. С учетом выявленных вариантов изучен их морфогенез и разработана дифференцированная тактика и способы их устранения. Предложенные подходы, в основу которых положены выявление и ликвидация повреждений ротаторно-бицепитального комплекса, а также разработанные способы оперативного лечения, позволили улучшить субъективные ощущения пациентов по шкале ООП с 56 [48; 58] до 24 [12; 28] (Me [Q₂₅; Q₇₅]) и показатели объективной оценки функции по шкале Rowe с 15 [15; 55] до 75 [75; 100] баллов.

Ключевые слова: нестабильность плечевого сустава, повреждения вращательной манжеты плеча, патология длинной головки бицепса, вращательная манжета плеча

Для цитирования: Даниленко, О. А. Хирургический подход к устранению хронической посттравматической нестабильности плечевого сустава / О. А. Даниленко, Е. Р. Макаревич, Н. С. Сердюченко // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 3. – С. 311–321. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-3-311-321>

Oleg A. Danilenko¹, Evgenii R. Makarevich², Corresponding Member Nikolai S. Serduchenko³

¹*Minsk City Clinical Center of Trauma and Orthopedics, Minsk, Republic of Belarus*

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

³*National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

**SURGICAL APPROACH TO ELIMINATING THE POST-TRAUMATIC INSTABILITY
OF THE SHOULDER JOINT**

Abstract. The results of treatment of 290 patients with chronic post-traumatic instability of the shoulder joint treated for the period 2004–2017 are studied. In accordance with the task, the authors identified 3 clinical variants of post-traumatic instability depending on the prevailing direction of the dislocation. Taking into account the revealed variants, the authors studied their morphogenesis and developed a differentiated tactic and ways of their elimination. The proposed approaches based on the identification and elimination of damages of the rotary-bicipital complex, as well as the developed methods of surgical treatment made it possible to improve the subjective feelings of patients on the OOP scale from 56 [48; 58] to 24 [12; 28] (Me [Q₂₅; Q₇₅]) and indicators of objective evaluation of the function on the Rowe scale from 15 [15; 55] to 75 [75; 100] points.

Keywords: instability of the shoulder joint, damage to the rotator cuff of the shoulder, pathology of the long biceps head, rotator cuff of the shoulder

For citation: Danilenko O. A., Makarevich E. R., Serduchenko N. S. Surgical approach to eliminating the post-traumatic instability of the shoulder joint. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2018, vol. 62, no. 3, pp. 311–321 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-3-311-321>

Введение. Частота вывихов плечевого сустава по данным различных авторов в популяции составляет от 8,2 до 44 случаев на 100000 человеко-лет [1–3]. При этом на травматическую нестабильность плечевого сустава приходится до 1,7 % от всех травм [1–3]. Некоторые из авторов указывают на то, что 50 % рецидивов дислокации приходится на возраст от 15 до 29 лет, а в группе с хронической нестабильностью плечевого сустава пациенты моложе 40 лет составляют до 96 % [1; 3–8]. Таким образом, заболевание поражает наиболее трудоспособный и социально активный контингент популяции, что определяет его практическую, экономическую и социальную значимость.

Согласно современным биомеханическим представлениям, стабильность плечевого сустава обеспечивается статическими (форма и ориентация гленоида, суставная губа и т. д.) и динамическими (элементы ротаторного аппарата и сухожилия длинной головки бицепса) стабилизаторами [9; 10]. На сегодняшний день накопилось достаточно много исследований, свидетельствующих о тесной взаимосвязи в обеспечении функции и стабильности плечевого сустава таких анатомических образований, как сухожилие длинной головки бицепса (СДГБ) и вращательная манжета плеча (ВМП). Несмотря на полученные данные о биомеханике плечевого сустава, практикующие ортопеды часто не учитывают результаты этих исследований при анализе причин возникновения посттравматической нестабильности, планировании и осуществлении оперативных вмешательств. Даже при своевременной диагностике повреждений в случае оперативного лечения их не устраняют, а используют методики, разработанные в начале и середине XX в., например, такие как операция Банкарта и Лятарже, что определяет, на наш взгляд, большой процент неудач при лечении нестабильности плечевого сустава, достигающих в ряде случаев 67 % [11; 12].

Таким образом, вопросы дифференцированной диагностической и лечебной тактики в зависимости от степени выраженности импрессионных дефектов и повреждений динамических стабилизаторов, а также разработка новых адекватных способов хирургической коррекции, направленных на восстановление имеющихся повреждений, представляется нам перспективной. Данная работа отражает опыт авторов, основанный на подходах к оперативному лечению нестабильности плечевого сустава с позиций комплексной диагностики и устранения характерных повреждений элементов статической и динамической стабилизации, последние из которых нами объединены в понятие «ротаторно-бицепитальный комплекс» (РБК).

Цель работы – улучшить результаты лечения пациентов с хронической посттравматической нестабильностью плечевого сустава при отсутствии выраженных костных дефицитов проксимального отдела плечевой кости и гленоида путем разработки дифференцированной тактики и новых способов оперативного лечения. Для достижения поставленной цели на основе систематизации травматических изменений ротаторно-бицепитального комплекса выделены клинические варианты хронической посттравматической нестабильности плечевого сустава, не сопровождающейся выраженными костными дефицитами проксимального отдела плечевой кости и гленоида, разработаны дифференцированные подходы и способы ее оперативного лечения путем восстановления ротаторного аппарата, а также повреждений со стороны сухожилия длинной головки бицепса и сухожильного ворота (pulley).

Материалы и методы исследования. Произведен анализ результатов лечения 290 пациентов, обратившихся на прием в период с 2004 по 2017 г. и оперированных на базе Могилевской областной больницы и ГКЦТО 6-й ГКБ г. Минска. Исследование согласовано с комиссиями по этике на базе лечебных учреждений и носило сплошной открытый характер. Произведен проспективный и ретроспективный анализ данных.

Критерии исключения из исследования: размеры импрессионного дефекта 2 типа и более по классификации Rowe, синдром дисплазии соединительной ткани, доказанные психические и поведенческие расстройства у пациентов, констатированные специалистом психиатром, беременность независимо от сроков, констатированный синдром зависимости от алкоголя и наркотических веществ, симптоматическая и первичная эпилепсия с наличием судорог и припадков, сопутствующие заболевания в стадии декомпенсации.

В структуре пролеченных пациентов преобладали мужчины – 187 (64,48 %). В исследуемой группе минимальный возраст составил 16 лет, а максимальный – 88. Возраст исследуемой группы – 46,1 [27; 62] лет (Me [Q₂₅; Q₇₅]). Распределение по возрасту выглядело следующим образом: от 16 до 55 лет – 235 (81,03 %), старше 55 лет – 55 (18,97 %).

При формировании подходов к лечению нестабильности с позиции РБК мы разделили ее на 3 вида: горизонтальная, вертикальная, комбинированная. Для уточнения степени и характера поражения элементов РБК и оценки размеров дефекта при предоперационном обследовании выполнены рентгенография и МРТ всем пациентам (100 %), УЗИ – 59 (20,3 %). МРТ позволила не только уточнить диагноз, размеры импрессии, но и спланировать объем предстоящего оперативного вмешательства. Ультрасонография проведена у пациентов с подозрением на сопутствующую нестабильность СДГБ.

По результатам проведенных диагностических мероприятий все пациенты были разделены на 3 подгруппы: 1 подгруппа ($n = 15$) – пациенты с превалирующим вертикальным компонентом нестабильности, 2 подгруппа ($n = 62$) – с превалирующим горизонтальным компонентом и 3 подгруппа ($n = 213$) – с комбинированным вариантом нестабильности. Каждый вариант нестабильности сопровождался характерными изменениями в определенных зонах плечевого сустава, распределенных нами по секторам. Лечение осуществлялось в соответствии с разработанной дифференцированной тактикой. Осмотры всех пациентов осуществлялись в сроки 3, 6 месяцев после операции и далее в качестве показателя брали последний зафиксированный осмотр пациента в месяцах. Срок наблюдения колебался от 6 до 120 месяцев и в среднем составил 12 [10; 15] месяцев.

В соответствии с методикой оценки контроля уровня субъективных ощущений использовали Оксфордский опросник для плеча, а для оценки объективной функции плечевого сустава применяли шкалу Rowe.

Результат лечения оценивали, сравнивая сумму баллов, набранную по шкалам до лечения и после. Для статистической обработки результатов использовалось программное обеспечение StatSoft Statistica 10 для Windows (Statsoft Inc., Tulsa, OK, USA), а также Microsoft Office Excel 2010 (Microsoft Corp., Redmond, WA, USA). Применялись общепринятые методы медико-биологической статистики. Для проверки соответствия распределения количественных параметров закону Гаусса использовался расчет критериев Колмогорова–Смирнова, а также оценка параметров описательной статистики. При соответствии распределения значений параметра закону Гаусса данные были представлены в виде $M \pm SD$, где M – среднее арифметическое значение параметра, а SD – стандартное отклонение. При несоответствии – данные в таблицах представляли в виде Me [Q₂₅; Q₇₅], где Me – медиана, Q₂₅ – значение 25 перцентиля, Q₇₅ – значение 75 перцентиля. Сравнительный анализ выборок производился с использованием критерия Вилкоксона и G -критерия знаков.

Результаты и их обсуждение. При анализе данных МРТ и последующей артроскопии сустава у пациентов 1 подгруппы выявлены повреждения ротаторной манжеты плеча, бицепитально-го элемента и импрессионный дефект головки плечевой кости, локализующийся в области верхней фасетки большого бугорка, не превышающий по размерам 1 тип по классификации Rowe во всех случаях (табл. 1).

Т а б л и ц а 1. Повреждения РБК, выявленные у пациентов 1 подгруппы ($n = 15$)

T a b l e 1. Damage of the rotary-bicipital complex revealed in the patients of the first subgroup ($n = 15$)

Показатель Index	Повреждения ротаторного аппарата, n (%) Damage of the rotatory apparatus, n (%)			Повреждения бицепитального элемента, n (%) Damage of the bicipital element, n (%)		Повреждения pulley, n (%) Damage of the pulley, n (%)	Повреждения межротаторного интервала, n (%) Damage of the intra-rotary interval, n (%)	Повреждения Банкарта, n (%) Bankart's damages, n (%)
	1 сектор	2 сектор	3 сектор	1 сектор	2 сектор			
Клинический осмотр ($n = 15$)	9 (60)	11 (73,3)	2 (13,3)	2 (13,3)	12 (80)	2 (13,3)	4 (26,7)	0
МРТ ($n = 15$)	15 (100)	15 (100)	15 (100)	6 (40)	12 (80)	15 (100)	5 (33,3)	15 (100)
УЗИ ($n = 15$)	15 (100)	13 (86,7)	11 (73,3)	0	12 (80)	10 (66,7)	5 (33,3)	3 (20)
Артроскопия ($n = 12$)	12 (100)	12 (100)	12 (100)	4 (33,3)	12 (100)	12 (100)	6 (50)	12 (100)

Как видно из данных табл. 1 наиболее чувствительными в отношении диагностики травм ротаторного и внутрисуставных повреждений бицепсального элемента являются методы МРТ и артроскопии. При диагностике внесуставных изменений со стороны бицепса наиболее ценны в диагностическом плане МРТ и ультрасонография (позволяет произвести динамическое исследование на нестабильность).

При обследовании у пациентов 1 подгруппы выявлялись повреждение SLAP (табл. 2), признаки латеральной нестабильности сухожилия длинной головки бицепса, повреждения ротаторного элемента и pulley во всех случаях.

Т а б л и ц а 2. Повреждения SLAP по Snyder у пациентов, выявленные по данным артроскопии

Table 2. SLAP damages of patients by Snyder revealed according the arthroscopy data

Подгруппа Subgroup	Тип 1 Type 1	Тип 2 Type 2	Тип 3 Type 3	Тип 4 Type 4
1 (n = 6)	1 (16,7 %)	4 (66,7 %)	1 (16,7 %)	0
2 (n = 38)	10 (26,3 %)	24 (63,2 %)	4 (10,5 %)	0
3 (n = 156)	58 (37,2 %)	30 (19,2 %)	44 (28,2 %)	24 (15,4 %)

Таким образом, повреждение выявлено у 6 пациентов и наиболее часто встречалось повреждение 2 типа по классификации Snyder.

Изменения со стороны ротаторного элемента в 1 подгруппе представляли собой полный или частичный отрыв от площадки крепления в зоне надостной мышцы и растяжение сухожилий подлопаточной и подостной мышц в нижней части (табл. 3). Повреждения внесуставной части бицепса в секторе 1 носили у 4 пациентов характер латеральной нестабильности.

Т а б л и ц а 3. Повреждения вращательной манжеты плеча у пациентов по данным МРТ

Table 3. Damages of the rotational shoulder arm of patients according to the MRT data

Показатель Index	Повреждение ротаторной манжеты плеча Damage of the rotational shoulder arm			
	1 сектор (подлопаточная мышца)	2 сектор (надостная мышца)	3 сектор (подостная мышца)	3 сектор (малая круглая мышца)
Подгруппа 1, полное повреждение	0	1 (6,7 %)	0	0
Подгруппа 1, частичное повреждение	15 (100 %)	14 (93,3 %)	10 (66,7 %)	2 (13,3 %)
Подгруппа 2, полное повреждение	4 (6,5 %)	0	0	0
Подгруппа 2, частичное повреждение	58 (93,5 %)	10 (16,1 %)	62 (100 %)	2 (3,2 %)
Подгруппа 3, полное повреждение	16 (7,5 %)	14 (6,6 %)	4 (1,9 %)	0
Подгруппа 3, частичное повреждение	197 (92,5 %)	36 (16,9 %)	209 (98,1 %)	7 (3,3 %)

Повреждение Банкарта отмечено нами у всех пациентов, при этом преобладали повреждения 1 и 2 типа, которые согласно разработанным нами подходам не требовали оперативной реконструкции.

У пациентов 1 подгруппы изменения выявлялись в 3 секторах и представляли собой рубцовое удлинение нижней части сухожилий подлопаточной, подостной и малой круглой мышц, частичный отрыв (зачастую чрескостный) на протяжении от верхней фасетки большого бугорка сухожилия надостной мышцы. Импрессионный дефект локализовался в области верхней фасетки большого бугорка, натяжение СДГБ зачастую сопровождалось частичным надрывом с рубцовым удлинением последнего и латеральной дислокацией, отрыв суставной губы приходился на нижний сегмент суставной поверхности лопатки (рис. 1, 2).

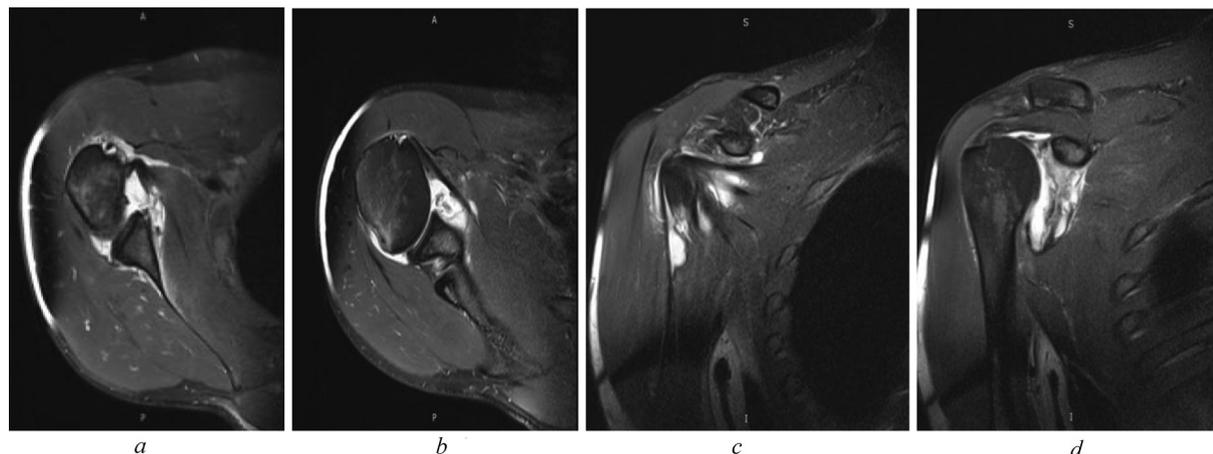


Рис. 1. МРТ повреждений у пациентов при вертикальной нестабильности плеча: *a* – определяется перерастянутая нижняя часть сухожилия подлопаточной мышцы и повреждение переднижнего отдела суставной губы (Банкарта); *b* – в верхнем отделе целостность и тонус сухожилия подлопаточной мышцы сохранены; *c* – на корональном срезе видно снижение тонуса подлопаточной мышцы в нижнем отделе; *d* – частичное повреждение сухожилия надостной мышцы в зоне крепления к верхней фасетке большого бугорка, повреждение внутрисуставной части бицепса

Fig. 1. MRI of injuries in patients with vertical instability of the shoulder: *a* – the overstretched lower part of the tendon of the subscapular muscle and the lesion of the anterior part of the joint lip (Bankart); *b* – in the upper part, the integrity and tonus of the tendon of the subscapular muscle are preserved; *c* – on the coronal section, a decrease in the tone of the subscapular muscle in the lower part is seen; *d* – partial damage of the tendon of the supra-spinatus in the attachment zone to the superior facet of the large tubercle, damage to the intraarticular part of the biceps

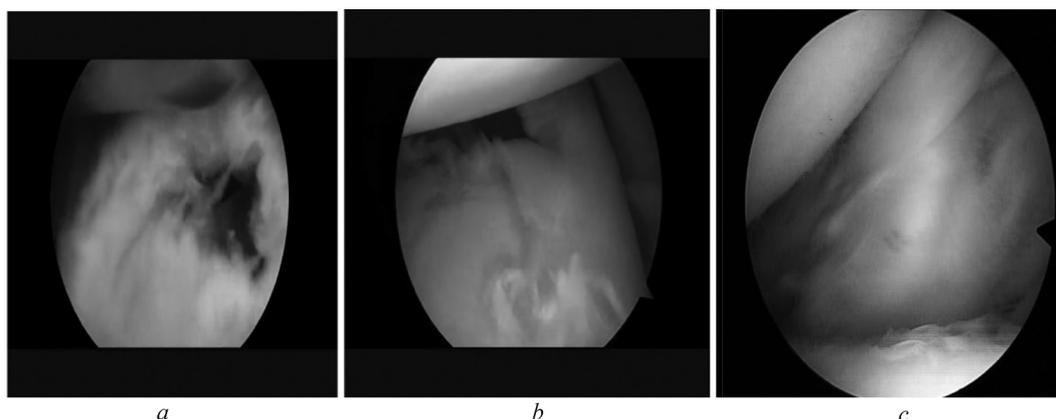


Рис. 2. Артроскопическая картина повреждений у пациентов при вертикальной нестабильности плеча: *a* – повреждение сухожилия надостной мышцы; *b* – повреждение внутрисуставной части бицепса; *c* – перерастяжение подлопаточной мышцы со снижением тонуса в нижнем отделе

Fig. 2. Arthroscopic picture of injuries in patients with vertical instability of the shoulder: *a* – damage to the tendon of the supra-spinatus; *b* – damage to the intraarticular part of the biceps; *c* – overgrowth of the subscapular muscle with a decrease in tone in the lower part

Факторами, предрасполагающими к развитию нестабильности, являются неприращение сухожилия надостной мышцы к площадке своей инсерции, рубцевание с удлинением со стороны нижних отделов сухожилий подлопаточной, подостной и малой круглой мышц. Перечисленные повреждения, не восстановленные в результате вправления и иммобилизации, становятся факторами развития нестабильности.

При лечении пациентов 1 подгруппы применялся разработанный нами способ как в mini-open, так и в артроскопическом формате, который подразумевал шов нижней части сухожилия подлопаточной, малой круглой и подостной мышц с их тонизацией и последующей трансоссальной фиксацией к зоне анатомического прикрепления, ремплиссаж с натяжением сухожилия надостной мышцы на область верхней фасетки большого бугорка. При выявленном SLAP-

повреждении осуществляли артроскопический этап вмешательства, санируя данное повреждение с использованием дифференцированной тактики, предложенной в работе S. J. Snyder (1990). При выявленной нестабильности СДГБ руководствовались разработанными дифференцированными подходами, в основу которых положена классификация W. F. Bennett. При оперативном лечении корректировали интраоперационно возникшие повреждения у пациентов с 3, 4 и 5 типом нестабильности СДГБ по Bennet. В случае выраженной сглаженности малого бугорка вмешательство дополнялось элементом, подразумевающим создание искусственного блока с использованием винта с его последующим укрытием костной кортикальной пластинкой, с дополнительной реконструкцией мягкотканого компонента согласно разработанным подходам для каждого из типов. При выраженной дегенерации СДГБ выполнялся тенodes последнего.

Пациентам с 3 типом повреждений выполняли вправление СДГБ в сухожильную борозду и его фиксацию посредством трансоссального шва сухожилия подлопаточной мышцы и медиальной порции клювоплечевой связки по разработанному способу, применяемому как в артроскопическом, так и в малоинвазивном форматах, суть которого сводится к следующему: осуществляется артроскопическая ревизия бицепса и поперечной связки, фиксация сухожилия бицепса в борозде путем ушивания удерживателя (медиальная порция клювоплечевой связки) и подлопаточной мышцы с использованием трансоссальных швов с последующей иммобилизацией.

При 4 типе выполняли вправление СДГБ в сухожильную борозду с восстановлением удерживателя (медиальная порция клювоплечевой связки) и рефиксацией сухожилия надостной мышцы, пластикой латеральной порции клювоплечевой связки.

Пациентам с 5 типом повреждений производили артроскопический или артроскопически-видеоассистированный тенodes сухожилия бицепса и в обязательном порядке восстановление повреждений ротаторного аппарата.

В 12 (80,0 %) случаях было выполнено оперативное лечение с использованием вмешательств, разработанных авторами в артроскопическом формате, в остальных – в виде mini-open.

При контрольных осмотрах у абсолютного большинства пациентов 1 подгруппы достигнуто улучшение субъективного самочувствия и восстановление стабильности и нормальной амплитуды движений в суставе (табл. 4).

Т а б л и ц а 4. Оценка результатов лечения пациентов с хронической посттравматической нестабильностью плечевого сустава на момент последнего обращения

T a b l e 4. Assessment of the treatment results of patients with the chronic post-traumatic instability of the shoulder joint at the time of the last visit

Подгруппа Subgroup	Оценка Evaluation					
	Отлично, n (%)	Хорошо, n (%)	Удовлетворительно, n (%)	Неудовлетворительно, n (%)	До оперативного лечения, балл, Ме [Q ₂₅ ; Q ₇₅]	После оперативного лечения, балл, Ме [Q ₂₅ ; Q ₇₅]
1 ООП (n = 15)	7 (46,7)	7 (46,7)	0	1 (6,7)	52 [46; 58]	26 [12; 28]
1 Rowe (n = 15)	10 (66,7)	4 (26,7)	0	1 (6,7)	15 [15; 25]	100 [75; 100]
2 ООП (n = 62)	46 (74,2)	14 (22,6)	1 (1,6)	1 (1,6)	56 [48; 58]	12 [12; 12]
2 Rowe (n = 62)	46 (74,1)	14 (22,6)	1 (1,6)	1 (1,6)	75 [55; 75]	100 [100; 100]
3 ООП (n = 213)	41 (19,2)	164 (77,0)	6 (2,8)	2 (0,9)	56 [48; 58]	26 [22; 28]
3 Rowe (n = 213)	37 (17,4)	166 (77,9)	8 (3,8)	2 (0,9)	15 [15; 25]	75 [75; 75]

Наблюдаемое различие в результатах балльной оценки пациентов подгруппы до и после примененных методов, оцененное с использованием критерия Вилкоксона, было статистически значимым ($p < 0,00001$).

В одном случае отмечен рецидив нестабильности у пациента через 6 месяцев после оперативного лечения. Полученный неблагоприятный результат лечения мы связываем с технической погрешностью на этапе внедрения артроскопического формата вмешательства. В дальнейшем пациент был подвергнут повторной реконструкции с благоприятным исходом.

Картина выявленных повреждений у пациентов 2 подгруппы имела существенные отличия от 1 подгруппы (табл. 5).

Т а б л и ц а 5. Повреждения, выявленные при применении диагностического алгоритма у пациентов 2 подгруппы (n = 62)

T a b l e 5. Damages of the patients of the second group (n = 62) revealed with the use of a diagnostic algorithm

Показатель Index	Повреждения ротаторного аппарата, n (%) Damage of the rotary apparatus, n (%)			Повреждения бицепитального элемента, n (%) Damage of the bicipital element, n (%)		Повреждения pulley, n (%) Damage of the pulley, n (%)	Повреждения межротаторного интервала, n (%) Damage of the intra rotary interval, n (%)	Повреждения Банкарта, n (%) Bankart's damages, n (%)
	1 сектор	2 сектор	3 сектор	1 сектор	2 сектор			
Клинический осмотр (n = 62)	56 (90,3)	26 (41,9)	56 (90,3)	42 (67,7)	44 (71,0)	0	15 (24,2)	0
МРТ (n = 62)	62 (100)	32 (51,6)	62 (100)	43 (69,4)	51 (82,3)	52 (83,9)	15 (24,2)	62 (100)
УЗИ (n = 19)	18 (94,7)	6 (31,6)	10 (52,6)	12 (63,2)	1 (5,3)	9 (47,4)	15 (78,9)	1 (5,3)
Артроскопия (n = 38)	38 (100)	13 (34,2)	38 (100)	5 (13,2)	38 (100)	38 (100)	15 (39,5)	38 (100)

SLAP-повреждение по данным МРТ выявлено у 43 (69,4 %) пациентов, при этом среди лиц, подвергнутых артроскопии, наиболее часто встречались повреждения 1 и 2 типа по классификации Snyder (табл. 2). Существенное отличие наблюдалось и в характере повреждений ротаторного аппарата, при котором превалировали повреждения со стороны 1 и 3 сектора.

МРТ и артроскопическая картина выявляли у пациентов данной подгруппы частичное или полное повреждение с рубцовым удлинением сухожилия подлопаточной мышцы, отрыв от головки плечевой кости в зоне большого бугорка подостной мышцы и частичное повреждение передних отделов надостной мышцы, нестабильность СДГБ разных типов с разрывом pulley, а в 15 случаях – разрыв межротаторного интервала. Повреждения Банкарта в данной подгруппе носили более тяжелый характер, что учтено при выполнении оперативных вмешательств.

Изменения, наиболее характерные для нестабильности плечевого сустава с превалирующим горизонтальным компонентом, локализовались в 1 и 3 секторах по Habermeyer. При горизонтальном типе нестабильности (переднем его варианте) выявлялись повреждение и рубцовое удлинение сухожилия подлопаточной мышцы, отрыв в зоне большого бугорка подостной мышцы и перерастяжение передних отделов подлопаточной мышцы, нестабильность СДГБ разных типов, а в ряде случаев разрыв межротаторного интервала, повреждение суставной губы в переднем отделе, SLAP-повреждение. При переднем варианте формируется частичный отрыв передней порции сухожилия подлопаточной мышцы и разрыв pulley, SLAP-повреждение, латеральная нестабильность СДГБ, повреждение Банкарта в переднем отделе сустава, импрессионный дефект локализуется в зоне большого бугорка по задней поверхности. У большинства пациентов частичные повреждения надостной мышцы и разрывы pulley после иммобилизации рубцевались в поврежденном отделе на этапе иммобилизации и не требовали реконструкции. При заднем варианте изменения носили зеркальный характер.

При реконструкции выполняли ремплиссаж с тонизацией сухожилий подостной и надостной мышцы на область фасетки большого бугорка, натяжение сухожилия подлопаточной мышцы.

Для лечения больных с посттравматической горизонтальной передней нестабильностью плеча с наличием дефекта применяли способ оперативного лечения посттравматической передней нестабильности плеча Хилл–Сакса не более 1 типа по классификации Rowe, подразумевающий артроскопическую ревизию плечевого сустава, ремплиссаж перерастянутых сухожилий коротких наружных ротаторов на область дефекта Хилл–Сакса, тонизацию ротаторного аппарата с осуществлением артроскопического контроля, устранение повреждений суставной губы и СДГБ, иммобилизацию.

В изучаемой группе в 50 (80,6 %) случаях выполнена модифицированная методика тонизации ротаторов плеча, подразумевающая под собой способ оперативного лечения посттравматической передней и передненижней нестабильности плеча при наличии импрессионного дефекта головки плечевой кости Хилл–Сакса 1 типа по классификации Rowe (патент Республики Беларусь), в 12 (19,4 %) случаях – вмешательство по способу оперативного лечения посттравматической перед-

ненижней нестабильности плеча при наличии импрессионного дефекта плечевой кости Хилл–Сакса 1 типа по классификации Rowe и дефекта Банкарта (патент Республики Беларусь).

Сравнение результатов клинического исследования до и после лечения показало, что получен положительный лечебный эффект с использованием применяемых методик (табл. 4). Наблюдаемое различие в результатах балльной оценки пациентов подгруппы до и после лечения, оцененное с использованием G -критерия знаков, было статистически значимым ($p < 0,001$).

В одном случае результат лечения нами и пациентом был оценен как удовлетворительный. У данного пациента, несмотря на проведенное лечение, через 6 месяцев отмечена нестабильность плечевого сустава 1 степени, проявившаяся в виде щелчков и ограничения движений, вызванного боязнью рецидива нестабильности. Отмеченный нами неблагоприятный исход мы наблюдали у молодого, физически развитого, активного пациента, имевшего в анамнезе большое количество дислокаций и оперированного с применением методики малоинвазивной тонизации ротаторов. Ретроспективно анализируя данный случай, мы связываем его с выраженными дегенеративными изменениями ротаторного аппарата, а также с физической нагрузкой в ранние сроки вопреки врачебным рекомендациям.

Наиболее многочисленной была 3 подгруппа пациентов с комбинированной нестабильностью плечевого сустава, где выявляли комбинацию повреждений по секторам в зависимости от превалирования вертикального или горизонтального компонентов нестабильности (табл. 2, 3, 6).

Т а б л и ц а 6. Повреждения, выявленные при применении диагностического алгоритма у пациентов 3 подгруппы ($n = 213$)

Table 6. Damages of the patients of the third group ($n = 213$) revealed with the use of a diagnostic algorithm

Показатель Index	Повреждения ротаторного аппарата, n (%) Damage of the rotary apparatus, n (%)			Повреждения бицепитального элемента, n (%) Damage of the bicipital element, n (%)		Повреждения pulley, n (%) Damage of the pulley, n (%)	Повреждения межротаторного интервала, n (%) Damage of the intrarotary interval, n (%)	Повреждения Банкарта, n (%) Bankart's damages, n (%)
	1 сектор	2 сектор	3 сектор	1 сектор	2 сектор			
Клинический осмотр ($n = 213$)	121 (56,8)	126 (59,2)	89 (41,8)	55 (25,8)	122 (57,3)	0	15 (7,0)	0
МРТ ($n = 213$)	213 (100)	213 (100)	213 (100)	188 (88,3)	156 (73,2)	134 (62,9)	48 (22,5)	213 (100)
УЗИ ($n = 25$)	25 (100)	12 (48,0)	20 (80,0)	25 (100)	11 (44,0)	4 (16,0)	5 (20,0)	5 (20,0)
Артроскопия ($n = 123$)	123 (100)	123 (100)	123 (100)	15 (12,2)	123 (100)	123 (100)	51 (41,5)	123 (100)

Существенное отличие наблюдалось и в характере повреждений ротаторного аппарата (табл. 3) и SLAP (табл. 2).

МРТ и артроскопическая картина выявляли у этих пациентов частичное с рубцовым удлинением или полное повреждение сухожилия подлопаточной мышцы, отрыв от головки плечевой кости в зоне большого бугорка подостной мышцы и частичное повреждение передних отделов надостной мышцы, нестабильность СДГБ разных типов с разрывом pulley, а в также в ряде случаев разрыв межротаторного интервала. Повреждения Банкарта отмечены во всех случаях и были более тяжелыми в сравнении с 1 и 2 подгруппой, что потребовало их реконструкции.

Механогенез возникновения повреждений обуславливается направлением дислокации и представляет собой комбинацию повреждений по секторам в зависимости от выраженности вертикального или горизонтального компонентов нестабильности. Импрессионный дефект головки плечевой кости при этом, как правило, располагался в задневерхнем отделе большого бугорка. При наиболее частом варианте передненижней дислокации отмечали повреждение сухожилия подлопаточной мышцы в ее нижнем отделе, однако оно чаще менее выражено, чем при вертикальной нестабильности, сухожилие надостной и подостной мышцы повреждалось в зоне прикрепления к верхней фасетке большого бугорка с переходом на ее заднюю часть.

При передненижней нестабильности выполняли вмешательство по разработанному нами способу как в артроскопическом, так и в малоинвазивном форматах, осуществляя трансоссаль-

ный шов с тонизацией сухожилия подлопаточной мышцы к зоне анатомического прикрепления, устранение повреждения Банкарта, ремплиссаж с тонизацией сухожилий надостной и подостной мышц на область верхней и задней фасетки большого бугорка, ликвидацию сопутствующей нестабильности СДГБ и повреждения суставной губы. Способ приводит к восстановлению тонуса коротких ротаторов плеча и одновременно способствует ликвидации возникающей во время вывиха патологической фазовой костной конгруэнтности между дефектом головки плеча и задне нижним краем суставной впадины лопатки, а также подразумевает устранение компонента нестабильности, обусловленного костным повреждением Банкарта и суставной губы.

Согласно нашим представлениям, которые подтверждаются биомеханическими исследованиями, вращательная манжета плеча и СДГБ оказывают стабилизирующее влияние как на вертикальный, так и на горизонтальный компонент стабильности плечевого сустава, изменяясь в зависимости от положения конечности, в большей степени от ее ротации и отведения. При наиболее частом варианте комбинированной (передне нижней дислокации) нестабильности происходит повреждение сухожилия подлопаточной мышцы в ее нижнем отделе, однако оно менее выражено, чем при изолированном вертикальном компоненте нестабильности, сухожилие надостной мышцы отрывается в зоне прикрепления к верхней фасетке большого бугорка с переходом на ее заднюю часть. СДГБ при данном варианте дислокации испытывает максимальную нагрузку у зоны своего прикрепления и, натянувшись, достаточно часто надрывает удерживающий аппарат в латеральном отделе и медиальную порцию сухожилия надостной мышцы, что приводит к латеральной нестабильности СДГБ.

При оперативном лечении пациентов 3 подгруппы был использован способ оперативного лечения посттравматической передне нижней нестабильности плеча (патент Республики Беларусь № 20571). Данный способ оперативного лечения посттравматической передне нижней нестабильности плеча с наличием дефекта Хилл–Сакса не более 1 типа по классификации Rowe подразумевает ремплиссаж дефекта Хилл–Сакса, тонизацию ротаторного аппарата, иммобилизацию. Восстановление повреждения со стороны бицепса зависит от локализации и степени выявленных изменений. При выявленном SLAP повреждении осуществляли артроскопический этап вмешательства с инвазией в плечевой сустав, санируя данное повреждение с использованием дифференцированной тактики, предложенной в работе S. J. Snyder. При нестабильности СДГБ руководствовались разработанными дифференцированными подходами, в основу которых положена классификация Bennet (2003).

Устранение превалирующих компонентов определялось наиболее заинтересованными секторами, импрессионный дефект головки плечевой кости при этом располагался в задне верхнем отделе большого бугорка. При наиболее частом варианте передне нижней дислокации отмечали повреждение сухожилия подлопаточной мышцы в ее нижнем отделе, однако оно было менее выражено, чем при изолированном вертикальном компоненте нестабильности, сухожилие надостной и подостной мышцы повреждались в зоне прикрепления к верхней фасетке большого бугорка с переходом на ее заднюю часть.

При лечении всех пациентов был использован способ оперативного лечения посттравматической передне нижней нестабильности плеча (патент Республики Беларусь № 20571). При выявленном SLAP и нестабильности СДГБ руководствовались подходами, аналогичными выше приведенным.

В 90 (42,3 %) случаях было выполнено оперативное лечение с использованием вмешательств, разработанных авторами в формате mini-open, а в 123 (57,7 %) – с использованием артроскопии.

Результаты лечения пациентов 3 подгруппы отражены в табл. 4. Отмечена положительная динамика показателей как по шкале ООП, так и Rowe. Наблюдаемое различие в результатах балльной оценки пациентов подгруппы до и после примененных методов, оцененное с использованием *G*-критерия знаков, было статистически значимым ($p < 0,001$).

В целом у пациентов с нестабильностью плечевого сустава с применением разработанных подходов нам удалось улучшить показатели оценки по шкале ООП с 56 [48; 58] до 24 [12; 28]. Оценка по шкале Rowe также отразила положительную динамику с 15 [15; 55] до 75 [75; 100] баллов. Наблюдаемое изменение оценки, исследованное с использованием *G*-критерия знаков, было статистически значимым ($p < 0,000001$).

Заключение. Хроническая посттравматическая нестабильность плечевого сустава наиболее часто встречается у лиц трудоспособного возраста, что определяет социальную значимость данной проблемы.

Механогенез, лежащий в основе возникновения повреждений, позволяет выделить 3 основных клинических типа посттравматической нестабильности плечевого сустава с характерными для них анатомо-морфологическими проявлениями.

При варианте нестабильности с превалирующим вертикальным компонентом характерен комплекс повреждений: рубцовое удлинение нижней части сухожилий подлопаточной, подостной и малой круглой мышц, частичный отрыв на протяжении от верхней фасетки большого бугорка сухожилия надостной мышцы, импрессионный дефект в этой зоне сухожилия длинной головки бицепса, частичный надрыв с рубцовым удлинением и латеральной дислокацией последнего, отрыв суставной губы в нижнем сегменте.

Для варианта нестабильности с превалирующим горизонтальным компонентом характерно: при переднем варианте – частичный отрыв передней порции сухожилия подлопаточной мышцы, разрыв pulley, SLAP-повреждение, латеральная нестабильность СДГБ, повреждение Банкарта и суставной губы в переднем отделе сустава, импрессионный дефект локализуется в зоне большого бугорка по задней поверхности; при заднем варианте – повреждение сухожилий подостной и малой круглой мышц с рубцовым их удлинением, повреждение и отрыв от фасетки малого бугорка сухожилия подлопаточной мышцы, нестабильность СДГБ с разрывом медиального удерживателя СДГБ вплоть до полного медиального вывиха сухожилия, разрывы суставной губы в заднем отделе сустава.

Пациенты с комбинированной нестабильностью плечевого сустава – наиболее часто встречающаяся группа. Механогенез возникновения повреждений обуславливается направлением первичной дислокации и представляет собой комбинацию повреждений структур по секторам в зависимости от выраженности вертикального или горизонтального компонентов нестабильности.

Предложенные подходы, в основу которых положены выявление и ликвидация повреждений ротаторно-бицепсального комплекса, а также разработанные способы оперативного лечения, являются перспективным путем улучшения клинико-функциональных результатов у пациентов с хронической посттравматической нестабильностью плечевого сустава.

Список использованных источников

1. Zacchilli, M. A. Epidemiology of shoulder dislocations presenting to emergency departments in the United States / M. A. Zacchilli, B. D. Owens // *J. Bone Joint Surg. (Am)*. – 2010. – Vol. 92, N 3. – P. 542–549. <https://doi.org/10.2106/jbjs.i.00450>
2. Clinical factors predicting fractures associated with an anterior shoulder dislocation / M. Emond [et al.] // *Acad. Emerg. Med.* – 2004. – Vol. 11, N 8. – P. 853–858. <https://doi.org/10.1197/j.aem.2004.03.009>
3. Boone, J. L. Management of failed instability surgery: how to get it right the next time / J. L. Boone, R. A. Arciero // *Orthop. Clin. North Am.* – 2010. – Vol. 41, N 3. – P. 367–379. <https://doi.org/10.1016/j.ocl.2010.02.009>
4. Kroner, K. The epidemiology of shoulder dislocations / K. Kroner, T. Lind, J. Jensen // *Arch. Orthop. Trauma Surg.* – 1989. – Vol. 108, N 5. – P. 288–290. <https://doi.org/10.1007/bf00932317>
5. Robinson, C. M. Anterior instability of the shoulder after trauma / C. M. Robinson, R. J. Dobson // *J. Bone Joint Surg (Br)*. – 2004. – Vol. 86, N 4. – P. 469–479. <https://doi.org/10.1302/0301-620x.86b4>
6. The prognosis following acute primary glenohumeral dislocation / R. L. te Slaa [et al.] // *J. Bone Joint Surg (Br)*. – 2004. – Vol. 86-B, N 1. – P. 58–64. <https://doi.org/10.1302/0301-620x.86b1.13695>
7. Скакун, П. Г. Отдаленные результаты лечения привычного вывиха плеча / П. Г. Скакун // *Травматология и ортопедия: современность и будущее*. – М.: Издательство РУДН, 2003. – С. 157–158.
8. Wang, R. Y. The recognition and treatment of first-time shoulder dislocation in active individuals / R. Y. Wang, R. A. Arciero, A. D. Mazzocca // *J. Orthop. Sports Phys. Ther.* – 2009. – Vol. 39, N 2. – P. 118–123. <https://doi.org/10.2519/jospt.2009.2804>
9. Glenohumeral stability. Biomechanical properties of passive and active stabilizers / L. U. Bigliani [et al.] // *Clin. Orthop. Relat. Res.* – 1996. – Vol. 330. – P. 13–30. <https://doi.org/10.1097/00003086-199609000-00003>
10. Su, W. R. The effect of posterosuperior rotator cuff tears and biceps loading on glenohumeral translation / W. R. Su, J. E. Budoff, Z. P. Luo // *Arthroscopy*. – 2010. – Vol. 26, N 5. – P. 578–586. <https://doi.org/10.1016/j.arthro.2009.09.007>
11. Instability of the shoulder: complex problems and failed repairs. Part II: Failed repairs / E. L. Flatow [et al.] // *J. Bone Joint Surg.* – 1998. – Vol. 80-A, N 2. – P. 284–298. <https://doi.org/10.2106/00004623-199802000-00016>
12. Warner, J. J. P. *Complex and Revision Problems in Shoulder Surgery* / J. J. P. Warner, J. P. Iannotti, E. L. Flatow. – Philadelphia: Lippincott Williams and Wilkins, 2005. – 669 p.

References

1. Zacchilli M. A., Owens B. D. Epidemiology of shoulder dislocations presenting to emergency departments in the United States. *Journal of Bone and Joint Surgery-American*, 2010, vol. 92, no. 3, pp. 542–549. <https://doi.org/10.2106/jbjs.i.00450>
2. Emond M., Le Sage N., Lavoie A., Rochette L. Clinical factors predicting fractures associated with an anterior shoulder dislocation. *Academic Emergency Medicine*, 2004, vol. 11, no. 8, pp. 853–858. <https://doi.org/10.1197/j.aem.2004.03.009>
3. Boone J. L., Arciero R. A. Management of failed instability surgery: how to get it right the next time. *Orthopedic Clinics of North America*, 2010, vol. 41, no. 3, pp. 367–379. <https://doi.org/10.1016/j.ocl.2010.02.009>
4. Kroner K., Lind T., Jensen J. The epidemiology of shoulder dislocations. *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery*, 1989, vol. 108, no. 5, pp. 288–290. <https://doi.org/10.1007/bf00932317>
5. Robinson C. M., Dobson R. J. Anterior instability of the shoulder after trauma. *Journal of Bone and Joint Surgery*, 2004, vol. 86, no. 4, pp. 469–479. <https://doi.org/10.1302/0301-620x.86b4>
6. te Slaa R. L., Wijffels M. P. J. M., Brand R., Marti R. K. The prognosis following acute primary glenohumeral dislocation. *Journal of Bone and Joint Surgery. British volume*, 2004, vol. 86-B, no. 1, pp. 58–64. <https://doi.org/10.1302/0301-620x.86b1.13695>
7. Skakun P. G. Long-term results of treatment of the shoulder-slip. *Travmatologiya i ortopediya: sovremennost' i budushchee [Traumatology and orthopedics: modern state and future]*, Moscow, Publishing house of the Russian University of Peoples' Friendship, 2003, pp. 157–158 (in Russian).
8. Wang R. Y., Arciero R. A., Mazzocca A. D. The recognition and treatment of first-time shoulder dislocation in active individuals. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 2009, vol. 39, no. 2, pp. 118–123. <https://doi.org/10.2519/jospt.2009.2804>
9. Bigliani L. U., Kelkar R., Flatow E. L., Pollock R. G., Mow V. C. Glenohumeral stability. Biomechanical properties of passive and active stabilizers. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 1996, vol. 330, pp. 13–30. <https://doi.org/10.1097/00003086-199609000-00003>
10. Su W. R., Budoff J. E., Luo Z. P. The effect of posterosuperior rotator cuff tears and biceps loading on glenohumeral translation. *Arthroscopy: The Journal of Arthroscopic & Related Surgery*, 2010, vol. 26, no. 5, pp. 578–586. <https://doi.org/10.1016/j.arthro.2009.09.007>
11. Flatow E. L., Miniaci A., Evans P. J., Simonian P. T., Warren R. F. Instability of the shoulder: complex problems and failed repairs. *The Journal of Bone and Joint Surgery (American Volume)*, 1998, vol. 80, no. 2, pp. 284–298. <https://doi.org/10.2106/00004623-199802000-00016>
12. Warner J. J. P., Iannotti J. P., Flatow E. L. *Complex and Revision Problems in Shoulder Surgery*. Philadelphia, Lippincott Williams and Wilkins, 2005. 669 p.

Информация об авторах

Даниленко Олег Анатольевич – канд. мед. наук, заведующий отделением. Минский городской клинический центр травматологии и ортопедии (ул. Уральская, 6, 220046, Минск, Республика Беларусь). E-mail: danilenco@yandex.by

Макаревич Евгений Реональдович – д-р мед. наук, профессор, заведующий кафедрой. Белорусский государственный медицинский университет (пр. Дзержинского, 83, 220116, Минск, Республика Беларусь).

Сердюченко Николай Сергеевич – член-корреспондент, д-р мед. наук, профессор, академик-секретарь. Национальная академия наук Беларуси (пр. Независимости, 66, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: lora323@mail.ru

Information about the authors

Danilenko Oleg Anatolievich – Ph. D. (Medicine), Head of the Department. Minsk City Clinical Center of Trauma and Orthopedics (6, Uralskaya Str., 220046, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: danilenco@yandex.by

Makarevich Evgenii Reonaldovich – D. Sc. (Medicine), Professor, Head of the Department. Belarusian State Medical University (83, Dzerzhynskiy Ave., 220116, Minsk, Republic of Belarus).

Serduchenko Nikolai Sergeevich – Corresponding Member, D. Sc. (Medicine), Professor, Academician-Secretary. National Academy of Sciences of Belarus (66, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lora323@mail.ru

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

УДК [575.224+575.23]:616.62-006
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-3-322-328>

Поступило в редакцию 10.05.2018
Received 10.05.2018

**М. П. Смаль¹, Н. В. Никитченко¹, А. И. Ролевич², Т. И. Набеева²,
член-корреспондент С. А. Красный², Р. И. Гончарова¹**

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

²*Республиканский научно-практический центр онкологии и медицинской радиологии
им. Н. Н. Александрова, Лесной, Республика Беларусь*

ВЛИЯНИЕ МЕТИЛИРОВАНИЯ ГЕНА *p16* НА РИСК ПРОГРЕССИРОВАНИЯ РАКА МОЧЕВОГО ПУЗЫРЯ БЕЗ МЫШЕЧНОЙ ИНВАЗИИ

Аннотация. Для более точного предсказания поведения опухоли и индивидуализации лечебного подхода необходима разработка новых методов прогноза клинического течения рака мочевого пузыря (РМП). В качестве перспективных прогностических маркеров рассматриваются мутационные и эпигенетические изменения генов, играющих ключевую роль в поддержании клеточного гомеостаза. В настоящем исследовании проведена оценка влияния метилирования промоторной области гена *p16* на риск рецидивирования, прогрессирования и неблагоприятного исхода заболевания на примере выборки из 158 пациентов с РМП. Эпигенетические изменения исследованного гена выявлены в 11,4 % уротелиальных карцином и не зависели от клинико-морфологических характеристик. Вместе с тем в подгруппе пациентов с немышечно-инвазивными опухолями аномальное метилирование *p16* статистически значимо связано с курением, а в подгруппе пациентов с мышечно-инвазивным РМП – с низкой степенью дифференцировки опухоли. В многофакторном регрессионном анализе пропорциональных рисков Кокса установлено, что гиперметилирование гена *p16* является независимым предиктором прогрессирования РМП без мышечной инвазии (отношение рисков 6,84; 95 % ДИ 1,6–29,9; $p = 0,011$). Применение данных об эпигенетической изменчивости гена *p16* позволит повысить точность прогноза клинического течения рака мочевого пузыря и подобрать адекватную тактику лечения.

Ключевые слова: рак мочевого пузыря, эпигенетические изменения, метилирование, *p16*, прогностическое значение

Для цитирования: Влияние метилирования гена *p16* на риск прогрессирования рака мочевого пузыря без мышечной инвазии / М. П. Смаль [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 3. – С. 322–328. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-3-322-328>

**Marharyta P. Smal¹, Nataliya V. Nikitchenko¹, Alexander I. Rolevich², Tatiana I. Nabebina²,
Corresponding Member Sergei A. Krasny², Roza I. Goncharova¹**

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

²*N. N. Alexandrov National Cancer Center of Belarus, Lesnoy, Republic of Belarus*

INFLUENCE OF *P16* GENE METHYLATION ON THE RISK OF PROGRESSION OF NON-MUSCLE INVASIVE BLADDER CANCER

Abstract. To accurately predict the tumor behavior and individualize the treatment approach, new methods for bladder cancer (BC) prognosis are required. The most promising prognostic markers are the mutational and epigenetic changes of genes involved in maintaining cellular homeostasis. In the present study, we evaluated the influence of *p16* promoter hypermethylation on the risk of recurrence, progression and disease outcome in the group of 158 BC patients. *p16* epigenetic changes were found in 11.4 % of urothelial carcinomas and did not depend on clinicomorphological characteristics. However, in the subgroup of patients with non-muscle invasive tumors, *p16* abnormal methylation was significantly associated with smoking, and in the subgroup of patients with muscle-invasive BC, it was linked to a high tumor grade (G3). In the multivariate Cox regression analysis, *p16* promoter hypermethylation was an independent predictor for bladder cancer progression (HR 6.84; 95 % CI 1.6–29.9; $p = 0.011$). The use of the data on the *p16* methylation status may improve the accuracy of prognosis of the bladder cancer clinical course and the selection of appropriate treatment strategy.

Keywords: bladder cancer, epigenetic changes, methylation, *p16*, prognostic value

For citation: Smal M. P., Nikitchenko N. V., Rolevich A. I., Nabebina T. I., Krasny S. A., Goncharova R. I. Influence of *p16* gene methylation on the risk of progression of non-muscle invasive bladder cancer. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2018, vol. 62, no. 3, pp. 322–328 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-3-322-328>

Введение. Рак мочевого пузыря (РМП) занимает девятое место по частоте встречаемости в мире. В структуре всех онкологических заболеваний населения Республики Беларусь РМП составляет 2,7 %, причем отмечается тенденция к постоянному росту заболеваемости [1]. Выбор тактики лечения пациентов с РМП определяется комплексом клинических и патоморфологических параметров, результаты оценки которых характеризуются недостаточно высокой объективностью и воспроизводимостью. В связи с этим выявление молекулярно-генетических маркеров прогноза клинического течения РМП приобретает высокую актуальность.

Результаты многочисленных исследований последних лет показывают, что наряду со структурными изменениями генов, значительный вклад в возникновение и развитие злокачественных новообразований также вносят нарушения эпигенетических механизмов регуляции экспрессии генов, наиболее изученным из которых является метилирование ДНК. Опухолевые клетки мочевого пузыря характеризуются глобальным гипометилированием и сайт-специфическим гиперметилированием CpG-островков в регуляторных областях генов, задействованных в поддержании клеточного гомеостаза [2].

Одним из таких генов является опухолевый супрессор *p16*, расположенный на хромосоме 9 (локус 9p21) и играющий ключевую роль в регуляции клеточного цикла. Белковый продукт этого гена препятствует образованию комплексов CDK4/cyclin D1, и, тем самым, задерживает Rb в дефосфорилированном состоянии, что не позволяет клетке вступить в S-фазу [3]. Гиперметилирование промоторной области гена *p16* обнаруживается в злокачественных новообразованиях различной локализации [4–6], приводит к снижению его экспрессии и транскрипционному сайленсингу [7]. В отношении рака мочевого пузыря данные о частоте и связи аномального метилирования гена *p16* с особенностями клинического течения заболевания противоречивы, а его прогностическая роль остается неясной, что определяет необходимость проведения настоящего исследования на примере пациентов с РМП, проживающих на территории Беларуси.

Материалы и методы исследования. Группу исследования составили 158 пациентов (124 мужчины и 34 женщины) в возрасте от 38 до 88 лет (медиана – 68 лет) с гистологически верифицированным диагнозом РМП, проходивших лечение в РНПЦ онкологии и медицинской радиологии им. Н. Н. Александрова в период с 2010 по 2014 г. Клинико-анамнестические данные пациентов представлены в табл. 1.

Выделение геномной ДНК проводили из свежего опухолевого материала согласно стандартному протоколу фенол-хлороформной экстракции.

Бисульфитную модификацию ДНК проводили с использованием набора EZ DNA Methylation-Gold Kit (Zymo Research) в соответствии с рекомендациями производителя. Статус метилирования промоторной области гена *p16* определяли с помощью метил-специфической ПЦР с праймерами, предложенными Zöchbauer-Müller и соавт. [8]. Реакционная смесь общим объемом 15 мкл содержала 100 нг бисульфит-конвертированной ДНК, 1х ПЦР буфер, 5 % ДМСО, 0,2 мкМ каждого праймера (Праймтех), 0,2 мМ dNTPs и 0,3 единицы активности Taq полимеразы (Праймтех). После 15-минутной инкубации при 95 °С проводили 40 циклов амплификации (денатурация при 99 °С – 1 с, отжиг при 65 °С и 62 °С – 10 с для выявления метилированной и неметилированной ДНК соответственно, элонгация при 72 °С – 10 с). Конечную элонгацию осуществляли в течение 2 мин при 72 °С. Анализ продуктов метил-специфической ПЦР проводили в 8 %-ном полиакриламидном геле при напряжении 130 В. Результаты электрофореза визуализировали с помощью бромистого этидия.

Статистическую обработку данных осуществляли с использованием пакета прикладных программ SPSS Statistics 17.0 (SPSS Inc.). Статистическую значимость различий между исследуемыми группами определяли с помощью теста χ^2 или двустороннего точного критерия Фишера. Безрецидивную выживаемость, выживаемость до прогрессирования и скорректированную выживаемость определяли по методу Каплана–Мейера, значимость различий между показателями выживаемости оценивали при помощи log-rank теста. Влияние потенциальных факторов риска на отдаленные результаты лечения оценивали с помощью моно- и мультивариантного регрессионного анализа пропорциональных рисков Кокса. В мультивариантный анализ были включены

Т а б л и ц а 1. Характеристика группы исследования и частота метилирования гена *p16* в зависимости от демографических и клинических параметровT a b l e 1. Patient characteristics and the frequency of *p16* gene methylation depending on the demographic and clinical parameters

Характеристика Characteristic	Класс Class	Общее количество, <i>n</i> Total, <i>n</i>	Метилирование <i>p16</i> , <i>n</i> (%) Methylation <i>p16</i> , <i>n</i> (%)	<i>p</i>
Пол	Мужской	124	17 (13,7)	0,12
	Женский	34	1 (2,9)	
Возраст	До 60 лет	36	5 (13,9)	0,56
	60 лет и более	122	13 (10,7)	
Категория T	Ta	17	1 (5,9)	0,88
	T1	86	10 (11,6)	
	T ≥ 2	55	7 (12,7)	
Наличие метастазов	Да	14	1 (7,1)	1,0
	Нет	144	17 (11,8)	
Размер опухоли	До 3 см	69	8 (11,6)	1,0
	3 см и более	89	10 (11,2)	
Степень дифференцировки (ВОЗ 1973)	G1	54	5 (9,3)	0,42
	G2	70	7 (9,7)	
	G3	33	6 (17,6)	
	Нет данных	1	–	
Степень дифференцировки (ВОЗ 2004)	PUNLMP / Low grade	88	11 (12,5)	0,80
	High grade	70	7 (10,0)	
Мультифокальность опухоли	Одиночная опухоль	55	6 (10,9)	1,0
	Множественная опухоль	103	12 (11,7)	
Макроскопический вид опухоли	Папиллярная	115	13 (11,3)	1,0
	Солидная/смешанная	43	5 (11,6)	
Статус курения	Не курит	46	2 (4,3)	0,062
	Курит/курил ранее	105	16 (15,2)	
	Нет данных	7	–	

П р и м е ч а н и е. PUNLMP (русск. ПУОНЗП) – папиллярная уротелиальная опухоль с низким злокачественным потенциалом.

N o t e: PUNLMP – Papillary Urothelial Neoplasm with a low Malignancy Potential.

переменные, показавшие наибольшую статистическую значимость ($p < 0,1$) в моновариантном анализе. Различия считались статистически значимыми при $p < 0,05$.

Результаты и их обсуждение. Частота эпигенетических изменений гена *p16* в опухолях мочевого пузыря. Аномальное метилирование гена *p16* обнаружено в 18 из 158 уротелиальных карцином, что составило 11,4 %.

В ряде исследований сообщалось о высокой частоте аномального метилирования промоторной области гена *p16* при различных типах рака, в том числе при лимфоме, раке молочной железы, печени, толстой кишки [4–6]. При РМП, согласно данным разных авторов, частота эпигенетических изменений *p16* варьирует в пределах от 1 до 73 % [9]. Наиболее близкое к установленному нами значение частоты эпигенетических нарушений гена *p16*, равное 10,4 %, определено Friedrich и соавт. [10]. Обнаруженная нами сравнительно невысокая частота (11,4 %) аномального метилирования гена *p16* может быть обусловлена тем, что значительная доля уротелиальных карцином несет гомо- и гетерозиготные делеции этого локуса, захватывающие CpG-островки, в 10–30 и 40–60 % случаев соответственно [11].

Статистическая обработка данных показала отсутствие достоверной связи эпигенетических нарушений гена *p16* с демографическими и клинико-морфологическими параметрами (табл. 1), тем не менее обнаружены некоторые закономерности в их распределении в определенных подгруппах пациентов.

Гиперметилирование промоторной области гена *p16* наблюдалось несколько чаще при мышечно-инвазивном РМП (МИ РМП) (12,7 %) по сравнению с РМП без мышечной инвазии (РМП

БМИ) (10,7 %) ($p = 0,79$), причем наименьшая частота эпигенетических нарушений, равная 5,9 %, отмечалась в уротелиальных карциномах категории Та. Полученные нами данные находятся в соответствии с результатами мета-анализа, проведенного Qi и соавт. [12], в котором показана специфичность метилирования *p16* к опухолевой ткани мочевого пузыря, однако, вместе с тем, отсутствие его достоверной связи с особенностями клинического течения РМП.

При анализе подгруппы пациентов с мышечно-инвазивным раком установлена статистически значимая ассоциация эпигенетических нарушений *p16* с низкодифференцированными опухолями ($p = 0,039$): при категориях G1–2 метилирование обнаружено в 1 из 30 случаев (3,3 %), при G3 – в 6 из 25 случаев (24,0 %).

Выявлена тенденция ($p = 0,062$) к увеличению частоты аномального метилирования *p16* у курящих или куривших ранее пациентов (табл. 1). В случае анализа подгруппы пациентов исключительно с немышечно-инвазивными уротелиальными карциномами наблюдаемая тенденция достигла уровня статистической значимости ($p = 0,014$). Так, у некурящих пациентов аномальное метилирование *p16* не обнаружено ни в одном из 33 случаев, у курящих его частота составила 16,9 % (11 из 65 наблюдений).

Известно, что до 50 % всех случаев РМП обусловлены негативным влиянием канцерогенов табачного дыма. Последние, по-видимому, индуцируют изменения профиля метилирования ряда генов-мишеней, что отражается в нарушении регуляции важнейших клеточных процессов, и, в конечном счете, приводит к возникновению и/или манифестации онкологических заболеваний. В работе Marsit и соавт. [13] на большой выборке пациентов с РМП показана значимая связь метилирования *p16* с курением, что согласуется с нашими данными.

Анализ прогностического значения статуса метилирования гена p16. Поскольку изменение профиля метилирования обуславливает не только инициацию канцерогенеза, но и его прогрессию, нами проведена оценка роли эпигенетической изменчивости гена *p16* в предсказании отдаленных результатов лечения РМП.

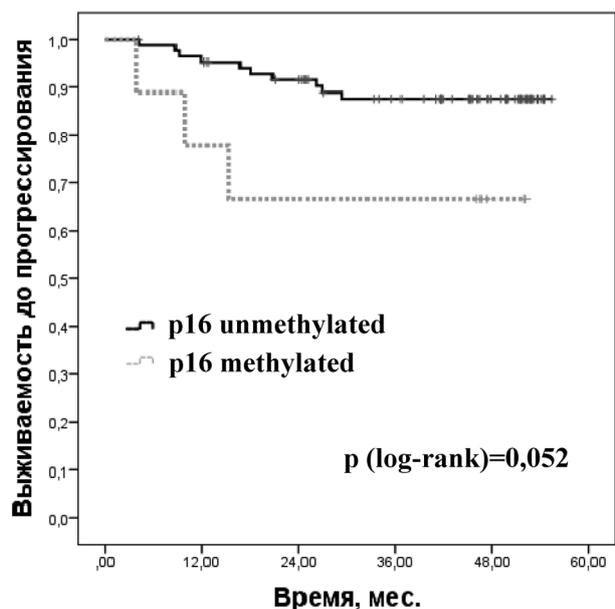
Анализ прогностического значения эпигенетических изменений проводился на выборке из 146 пациентов, отдаленные результаты лечения 12 пациентов не прослежены. Длительность наблюдения колебалась от 32 до 60 месяцев, медиана наблюдения составила 46 месяцев. В течение этого периода в группе из 94 пациентов с РМП БМИ выявлено 27 (28,7 %) рецидивов, в 13,8 % (13 из 94) случаев зарегистрировано прогрессирование в мышечно-инвазивную форму. В общей группе пациентов 48 человек умерли, в том числе 24 от РМП.

Как видно из данных табл. 2, нами не выявлено прогностической значимости эпигенетических изменений гена *p16* в отношении рецидивирования и онкоспецифической выживаемости пациентов.

Т а б л и ц а 2. Анализ прогностического значения аномального метилирования гена *p16* в отношении отдаленных результатов лечения

Table 2. Analysis of the prognostic value of the *p16* gene abnormal methylation with respect to recurrence-free, progression-free, overall and cancer-specific survival

Отдаленный результат лечения Variable	Подгруппа Subgroup	Количество событий / общее число пациентов Number of events / total number of patients	3-летняя выживаемость (95 % ДИ) 3-year survival (95 % CI)	p (log-rank)
Рецидивирование	<i>p16 unmeth</i>	24 / 85	75,4 % (66,0–84,8)	0,54
	<i>p16 meth</i>	3 / 9	66,7 % (35,9–97,5)	
Прогрессирование	<i>p16 unmeth</i>	10 / 85	87,6 % (80,3–94,9)	0,052
	<i>p16 meth</i>	3 / 9	66,7 % (35,9–97,5)	
Общая выживаемость	<i>p16 unmeth</i>	44 / 130	71,3 % (63,5–79,1)	0,60
	<i>p16 meth</i>	4 / 16	75,0 % (53,8–96,2)	
Скорректированная выживаемость	<i>p16 unmeth</i>	21 / 130	83,4 % (76,7–90,1)	0,79
	<i>p16 meth</i>	3 / 16	81,3 % (62,1–100)	
Скорректированная выживаемость при РМП БМИ	<i>p16 unmeth</i>	7 / 82	91,9 % (85,6–98,2)	0,78
	<i>p16 meth</i>	1 / 9	88,9 % (68,3–100)	
Скорректированная выживаемость при МИ РМП	<i>p16 unmeth</i>	14 / 48	67,7 % (53,8–81,6)	0,96
	<i>p16 meth</i>	2 / 7	71,4 % (37,9–100)	



Выживаемость до прогрессирования в зависимости от статуса метилирования гена *p16*
Survival to progression depending on the *p16* gene methylation status

В то же время наблюдалось значительное снижение 3-летней выживаемости до прогрессирования при наличии гиперметилирования *p16* по сравнению с его отсутствием: 66,7 (95 % ДИ 35,9–97,5 %) и 87,6 % (95 % ДИ 80,3–94,9 %) соответственно (рисунок).

В однофакторном регрессионном анализе Кокса влияние эпигенетических изменений *p16* на повышение риска прогрессирования не достигло статистической значимости (отношение рисков (ОР) 3,34; 95 % ДИ 0,9–12,2; $p = 0,067$). Вместе с тем в многофакторной модели с пошаговым исключением независимыми предикторами более низких уровней выживаемости до прогрессирования являлись наличие предшествующих рецидивов (ОР 13,59; 95 % ДИ 3,7–50,0; $p < 0,001$), гиперметилирование *p16* (ОР 6,84; 95 % ДИ 1,6–29,9; $p = 0,011$), возраст старше 70 лет (ОР 4,89; 95 % ДИ 1,4–16,9; $p = 0,012$) и низкая степень дифференцировки опухоли (ОР 5,07; 95 % ДИ 1,4–18,7; $p = 0,015$).

Результаты большинства исследований указывают на отсутствие прогностической ценности эпигенетических изменений *p16* при РМП [10; 14]. Однако в ряде работ отмечалась статистически значимая ассоциация метилирования исследуемого гена с метастазированием, повышенным риском рецидивов и прогрессии заболевания [6; 15]. Нами выявлено независимое от стандартных клинических факторов прогноза влияние эпигенетических нарушений *p16* на риск прогрессирования РМП БМИ, что открывает возможности для их применения в качестве молекулярных маркеров прогноза клинического течения заболевания.

Заключение. Полученные нами данные свидетельствуют о невысокой частоте (11,4 %) метилирования промоторной области гена *p16* в опухолевой ткани мочевого пузыря. При анализе общей группы пациентов обнаружено, что частота эпигенетических изменений *p16* не зависит от клинко-морфологических характеристик. В то же время в подгруппе пациентов с мышечно-инвазивным РМП аномальное метилирование *p16* статистически значимо связано с низкой степенью дифференцировки опухоли, а в подгруппе пациентов с немышечно-инвазивными уротелиальными карциномами – с курением, что указывает на возможное влияние канцерогенов табачного дыма на возникновение данных эпигенетических нарушений. Анализ прогностического значения аномального метилирования гена *p16* показал его независимое влияние на риск прогрессирования РМП БМИ (ОР 6,84; 95 % ДИ 1,6–29,9; $p = 0,011$).

Ввиду потенциальной обратимости, эпигенетические изменения, в отличие от структурных нарушений генов, представляются перспективными мишенями для противораковой терапии. Особую актуальность восстановление профиля метилирования приобретает в связи с выявленной нами статистически значимой связью эпигенетических изменений гена *p16* с прогрессированием РМП БМИ. Использование данных о статусе метилирования гена *p16* в комплексе с другими молекулярными маркерами позволит своевременно выявлять группу пациентов высокого риска неблагоприятного исхода заболевания и применять адекватное лечение.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ (грант M16K-017).

Acknowledgments. This work was financially supported by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (Agreement no. M16K-017).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Океанов, А. Е. Статистика онкологических заболеваний в Республике Беларусь (2004–2013) / А. Е. Океанов, П. И. Моисеев, Л. Ф. Левин; под ред. О. Г. Суконко. – Минск: РНПЦ ОМР, 2014. – 382 с.
2. Enokida, H. Epigenetics in bladder cancer / H. Enokida, M. Nakagawa // *Int. J. Clin. Oncol.* – 2008. – Vol. 13, N 4. – P. 298–307. <https://doi.org/10.1007/s10147-008-0811-1>
3. Kopnin, B. P. Targets of Oncogenes and Tumor Suppressors: Key for Understanding Basic Mechanisms of Carcinogenesis / B. P. Kopnin // *Biochemistry.* – 2000. – Vol. 65, N 1. – P. 2–27.
4. Prognostic significance of epigenetic inactivation of p16, p15, MGMT and DAPK genes in follicular lymphoma / M. Krajnovic [et al.] // *Med. Oncol.* – 2013. – Vol. 30, N 1. – P. 441. <https://doi.org/10.1007/s12032-012-0441-3>
5. Promoter methylation of MLH1, PMS2, MSH2 and p16 is a phenomenon of advanced-stage HCCs / I. Hinrichsen [et al.] // *PLoS One.* – 2014. – Vol. 9, N 1. – P. e84453. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0084453>
6. Prevalence of aberrant methylation of p14ARF over p16INK4a in some human primary tumors / G. Dominguez [et al.] // *Mutat. Res.* – 2003. – Vol. 530, N 1–2. – P. 9–17. [https://doi.org/10.1016/s0027-5107\(03\)00133-7](https://doi.org/10.1016/s0027-5107(03)00133-7)
7. Rocco, J. W. p16(MTS-1/CDKN2/INK4a) in cancer progression / J. W. Rocco, D. Sidransky // *Exp. Cell Res.* – 2001. – Vol. 264, N 1. – P. 42–55. <https://doi.org/10.1006/excr.2000.5149>
8. Aberrant promoter methylation of multiple genes in non-small cell lung cancers / S. Zöchbauer-Müller [et al.] // *Cancer Res.* – 2001. – Vol. 61, N 1. – P. 249–255.
9. Integrated genetic and epigenetic analysis of bladder cancer reveals an additive diagnostic value of FGFR3 mutations and hypermethylation events / R. R. Serizawa [et al.] // *Int. J. Cancer.* – 2011. – Vol. 129, N 1. – P. 78–87. <https://doi.org/10.1002/ijc.25651>
10. Prognostic relevance of methylation markers in patients with non-muscle invasive bladder carcinoma / M. G. Friedrich [et al.] // *Eur. J. Cancer.* – 2005. – Vol. 41, N 17. – P. 2769–2778. <https://doi.org/10.1016/j.ejca.2005.07.019>
11. Comprehensive molecular characterization of urothelial bladder carcinoma / Cancer Genome Atlas Research Network // *Nature.* – 2014. – Vol. 507, N 7492. – P. 315–322. <https://doi.org/10.1038/nature12965>
12. The relationship between promoter methylation of p16 gene and bladder cancer risk: a meta-analysis / D. Qi [et al.] // *Int. J. Clin. Exp. Med.* – 2015. – Vol. 8, N 11. – P. 20701–20711.
13. Carcinogen exposure and gene promoter hypermethylation in bladder cancer / C. J. Marsit [et al.] // *Carcinogenesis.* – 2006. – Vol. 27, N 1. – P. 112–116. <https://doi.org/10.1093/carcin/bgi172>
14. Promoter hypermethylation in tumour suppressor genes shows association with stage, grade and invasiveness of bladder cancer / S. Jarmalaite [et al.] // *Oncology.* – 2008. – Vol. 75, N 3–4. – P. 145–151. <https://doi.org/10.1159/000158665>
15. Promoter hypermethylation is associated with tumor location, stage, and subsequent progression in transitional cell carcinoma / J. W. Catto [et al.] // *J. Clin. Oncol.* – 2005. – Vol. 23, N 13. – P. 2903–2910. <https://doi.org/10.1200/jco.2005.03.163>

References

1. Okeanov A. E., Moiseev P. I., Levin L. F. *Cancer Statistics in the Republic of Belarus (2004–2013)*. Minsk, Republican Scientific and Practical Center of Oncology and Medical Radiology, 2014. 382 p. (in Russian).
2. Enokida H., Nakagawa M. Epigenetics in bladder cancer. *International Journal of Clinical Oncology*, 2008, vol. 13, no. 4, pp. 298–307. <https://doi.org/10.1007/s10147-008-0811-1>
3. Kopnin B. P. Targets of Oncogenes and Tumor Suppressors: Key for Understanding Basic Mechanisms of Carcinogenesis. *Biochemistry*, 2000, vol. 65, no. 1, pp. 2–27.
4. Krajnovic M., Radojković M., Davidović R., Dimitrijević B., Krtolica K. Prognostic significance of epigenetic inactivation of p16, p15, MGMT and DAPK genes in follicular lymphoma. *Medical Oncology*, 2013, vol. 30, no. 1, pp. 441. <https://doi.org/10.1007/s12032-012-0441-3>
5. Hinrichsen I., Kemp M., Peveling-Oberhag J., Passmann S., Plotz G., Zeuzem S., Brieger A. Promoter methylation of MLH1, PMS2, MSH2 and p16 is a phenomenon of advanced-stage HCCs. *PLoS One*, 2014, vol. 9, no. 1, pp. e84453. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0084453>
6. Dominguez G., Silva J., Garcia J. M., Silva J. M., Rodriguez R., Muñoz C., Chacón I., Sanchez R., Carballido J., Colás A., España P., Bonilla F. Prevalence of aberrant methylation of p14ARF over p16INK4a in some human primary tumors. *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*, 2003, vol. 530, no. 1–2, pp. 9–17. [https://doi.org/10.1016/s0027-5107\(03\)00133-7](https://doi.org/10.1016/s0027-5107(03)00133-7)
7. Rocco J. W., Sidransky D. p16(MTS-1/CDKN2/INK4a) in cancer progression. *Experimental Cell Research*, 2001, vol. 264, no. 1, pp. 42–55. <https://doi.org/10.1006/excr.2000.5149>
8. Zöchbauer-Müller S., Fong K. M., Virmani A. K., Geradts J., Gazdar A. F., Minna J. D. Aberrant promoter methylation of multiple genes in non-small cell lung cancers. *Cancer Research*, 2001, vol. 61, no. 1, pp. 249–255.
9. Serizawa R. R., Ralfkiaer U., Steven K., Lam G. W., Schmiedel S., Schütz J., Hansen A. B., Horn T., Guldborg P. Integrated genetic and epigenetic analysis of bladder cancer reveals an additive diagnostic value of FGFR3 mutations and hypermethylation events. *International Journal of Cancer*, 2011, vol. 129, no. 1, pp. 78–87. <https://doi.org/10.1002/ijc.25651>
10. Friedrich M. G., Chandrasoma S., Siegmund K. D., Weisenberger D. J., Cheng J. C., Toma M. I., Huland H., Jones P. A., Liang G. Prognostic relevance of methylation markers in patients with non-muscle invasive bladder carcinoma. *European Journal of Cancer*, 2005, vol. 41, no. 17, pp. 2769–2778. <https://doi.org/10.1016/j.ejca.2005.07.019>
11. Cancer Genome Atlas Research Network. Comprehensive molecular characterization of urothelial bladder carcinoma. *Nature*, 2014, vol. 507, no. 7492, pp. 315–322. <https://doi.org/10.1038/nature12965>

12. Qi D., Li J., Jiang M., Liu C., Hu Y., Li M., Su J., Que B., Ji W. The relationship between promoter methylation of p16 gene and bladder cancer risk: a meta-analysis. *International Journal of Clinical and Experimental Medicine*, 2015, vol. 8, no. 11, pp. 20701–20711.

13. Marsit C. J., Karagas M. R., Danaee H., Liu M., Andrew A., Schned A., Nelson H. H., Kelsey K. T. Carcinogen exposure and gene promoter hypermethylation in bladder cancer. *Carcinogenesis*, 2006, vol. 27, no. 1, pp. 112–116. <https://doi.org/10.1093/carcin/bgi172>

14. Jarmalaite S., Jankevicius F., Kurgonaitė K., Suziedelis K., Mutanen P., Husgafvel-Pursiainen K. Promoter hypermethylation in tumour suppressor genes shows association with stage, grade and invasiveness of bladder cancer. *Oncology*, 2008, vol. 75, no. 3–4, pp. 145–151. <https://doi.org/10.1159/000158665>

15. Catto J. W., Azzouzi A. R., Rehman I., Feeley K. M., Cross S. S., Amira N., Fromont G., Sibony M., Cussenot O., Meuth M., Hamdy F. C. Promoter hypermethylation is associated with tumor location, stage, and subsequent progression in transitional cell carcinoma. *Journal of Clinical Oncology*, 2005, vol. 23, no. 13, pp. 2903–2910. <https://doi.org/10.1200/jco.2005.03.163>

Информация об авторах

Смаль Маргарита Петровна – канд. биол. наук, ст. науч. сотрудник. Институт генетики и цитологии НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: marharyta.smal@gmail.com.

Никитченко Наталья Васильевна – науч. сотрудник. Институт генетики и цитологии НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: N.Nikitchenko@igc.by.

Ролевич Александр Игоревич – канд. мед. наук, вед. науч. сотрудник. РНПЦ онкологии и медицинской радиологии им. Н. Н. Александрова (223040, аг. Лесной, Минский р-н, Минская обл., Республика Беларусь). E-mail: alexander.rolevich@gmail.com.

Набебина Татьяна Ивановна – канд. мед. наук, врач. РНПЦ онкологии и медицинской радиологии им. Н. Н. Александрова (223040, аг. Лесной, Минский р-н, Минская обл., Республика Беларусь). E-mail: nabebina.t@yandex.by.

Красный Сергей Анатольевич – член-корреспондент, д-р мед. наук, профессор, заместитель директора. РНПЦ онкологии и медицинской радиологии им. Н. Н. Александрова (223040, аг. Лесной, Минский р-н, Минская обл., Республика Беларусь). E-mail: sergeykrasny@tut.by.

Гончарова Роза Иосифовна – д-р биол. наук, профессор, заведующий лабораторией. Институт генетики и цитологии НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: R.Goncharova@igc.by.

Information about the authors

Smal Marharyta Petrovna – Ph. D. (Biology), Senior researcher. Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: marharyta.smal@gmail.com.

Nikitchenko Nataliya Vasilievna – Researcher. Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: N.Nikitchenko@igc.by.

Rolevich Alexander Igorevich – Ph. D. (Medicine), Leading researcher. N. N. Alexandrov National Cancer Center of Belarus (223040, Lesnoy, Minsk region, Minsk district, Republic of Belarus). E-mail: alexander.rolevich@gmail.com.

Nabebina Tatiana Ivanovna – Ph. D. (Medicine), Doctor. N. N. Alexandrov National Cancer Center of Belarus (223040, Lesnoy, Minsk region, Minsk district, Republic of Belarus). E-mail: nabebina.t@yandex.by.

Krasny Sergey Anatolievich – Corresponding Member, D. Sc. (Medicine), Professor, Deputy Director. N. N. Alexandrov National Cancer Centre of Belarus (223040, Lesnoy, Minsk region, Minsk district, Republic of Belarus). E-mail: sergeykrasny@tut.by.

Goncharova Roza Iosifovna – D. Sc. (Biology), Professor, Head of the Laboratory. Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: R.Goncharova@igc.by.

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

НАУКИ О ЗЕМЛЕ
EARTH SCIENCES

УДК 551.2+551.3(476)
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-3-329-334>

Поступило в редакцию 26.01.2018
Received 26.01.2018

Академик А. В. Матвеев

Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

**РАЙОНИРОВАНИЕ ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ ПО ВОЗМОЖНЫМ ПОСЛЕДСТВИЯМ
ПРОЯВЛЕНИЯ ПРИРОДНЫХ И ПРИРОДНО-АНТРОПОГЕННЫХ ОПАСНОСТЕЙ
ЛИТОСФЕРНОГО КЛАССА**

Аннотация. Возможные последствия реализации природных и природно-антропогенных опасностей литосферного класса (экстремальных геологических процессов) оценивались на основании частоты, площади и интенсивности их проявления, формирующейся загрязненности покровных отложений, нарушенности природных и техногенных комплексов, влияния на здоровье населения, предполагаемых затрат на реабилитацию территории. Перечисленные критерии подразделялись на несколько градаций по количественным или качественным показателям. На основании этих критериев и схем распространения экстремальных видов геодинамики проведено районирование территории региона с выделением следующих таксонов: с незначительной, умеренной, повышенной, высокой, весьма высокой и весьма высокой в зонах активных разломов степенью возможных неблагоприятных последствий опасных геологических процессов.

Ключевые слова: природные и природно-антропогенные опасности, литосферный класс, последствия, районирование

Для цитирования: Матвеев, А. В. Районирование территории Беларуси по возможным последствиям проявления природных и природно-антропогенных опасностей литосферного класса / А. В. Матвеев // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 3. – С. 329–334. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-3-329-334>

Academician Aleksey V. Matveyev

Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

**ZONING OF THE TERRITORY OF BELARUS THROUGH POSSIBLE CONSEQUENCES OF MANIFESTATION
OF NATURE AND NATURE-ANTHROPOGENOUS HAZARDS OF LITHOSPHERE CLASS**

Abstract. The schemes of modern endogenous, exogenous and technogenic geological processes, intensity, frequency, and the area of their spread, the caused disturbances of natural and man-made complexes, an impact on public health, the level of proposed costs for rehabilitation of territories were used for the analysis of the possible consequences of realization of nature and nature-anthropogeneous hazards of lithosphere class. The zoning of the region with the allocation of areas with low, moderate, increased, high, very high and very high in the zones of active faults, the degrees of adverse consequences of development of extreme types of modern geodynamics was carried out using the mentioned data.

Keywords: nature and nature-anthropogeneous hazards, lithosphere class, consequences, regionalization

For citation: Matveyev A. V. Zoning of the territory of Belarus through possible consequences of manifestation of nature and nature-anthropogeneous hazards of lithosphere class. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2018, vol. 62, no. 3, pp. 329–334 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-3-329-334>

Введение. Экстремальные проявления современной геодинамики, среди которых на территории Беларуси наиболее распространенными являются плоскостная и линейная (овражная) эрозия, пыльные бури, гравитационные процессы, карст, суффозия, подтопление территорий, сейсмичность, другие геодинамические процессы в зонах активных разломов могут существенно

влиять на геоэкологическую обстановку в регионе, вызывать деформации природных комплексов, сельскохозяйственных угодий и инженерных сооружений, что позволяет относить подобные процессы к категории природных и природно-антропогенных опасностей. Частота развития неблагоприятных геодинамических процессов заметно возросла в конце XX и начале XXI в. [1]. Этим объясняется повышенное внимание к изучению данных явлений во многих странах, не исключение и Беларусь [2; 3].

В зависимости от среды, в которой проявляются опасности, они подразделяются на три класса – атмосферный, гидросферный и литосферный. Последний класс по количеству видов является наиболее распространенным. Исследования именно этого класса опасностей проводились в Институте природопользования НАН Беларуси в 2015–2017 гг. Полученные результаты по одному из важнейших направлений выполненных исследований – районированию территории по возможным неблагоприятным последствиям реализации риска проявления природных и природно-антропогенных опасностей рассматриваются в данном сообщении.

Материалы и методы исследований. Основным фактическим материалом для выполнения исследований послужили специально построенные схемы развития экстремальных геологических процессов [3–5], учитывались теоретические разработки зарубежных коллег, а также собственный опыт и результаты работ по районированию территории региона по геологическим, геоморфологическим, геодинамическим и геохимическим особенностям [6–8].

Оценка возможных последствий опасных геологических процессов (опасностей литосферного класса), учитывая опыт исследований на смежных территориях [6; 9–11] и в пределах Беларуси [2; 7], проводилась в баллах, которые выражались либо в количественных, либо в качественных величинах в зависимости от степени изученности. При этом во внимание принимались не только основные виды опасностей, которые перечислены выше, но и некоторые их обобщенные характеристики (интегральные оценки интенсивности экзогенных и техногенных процессов, общая степень загрязненности территории), влияние которых на экологическую обстановку в регионе рассмотрена ранее [12].

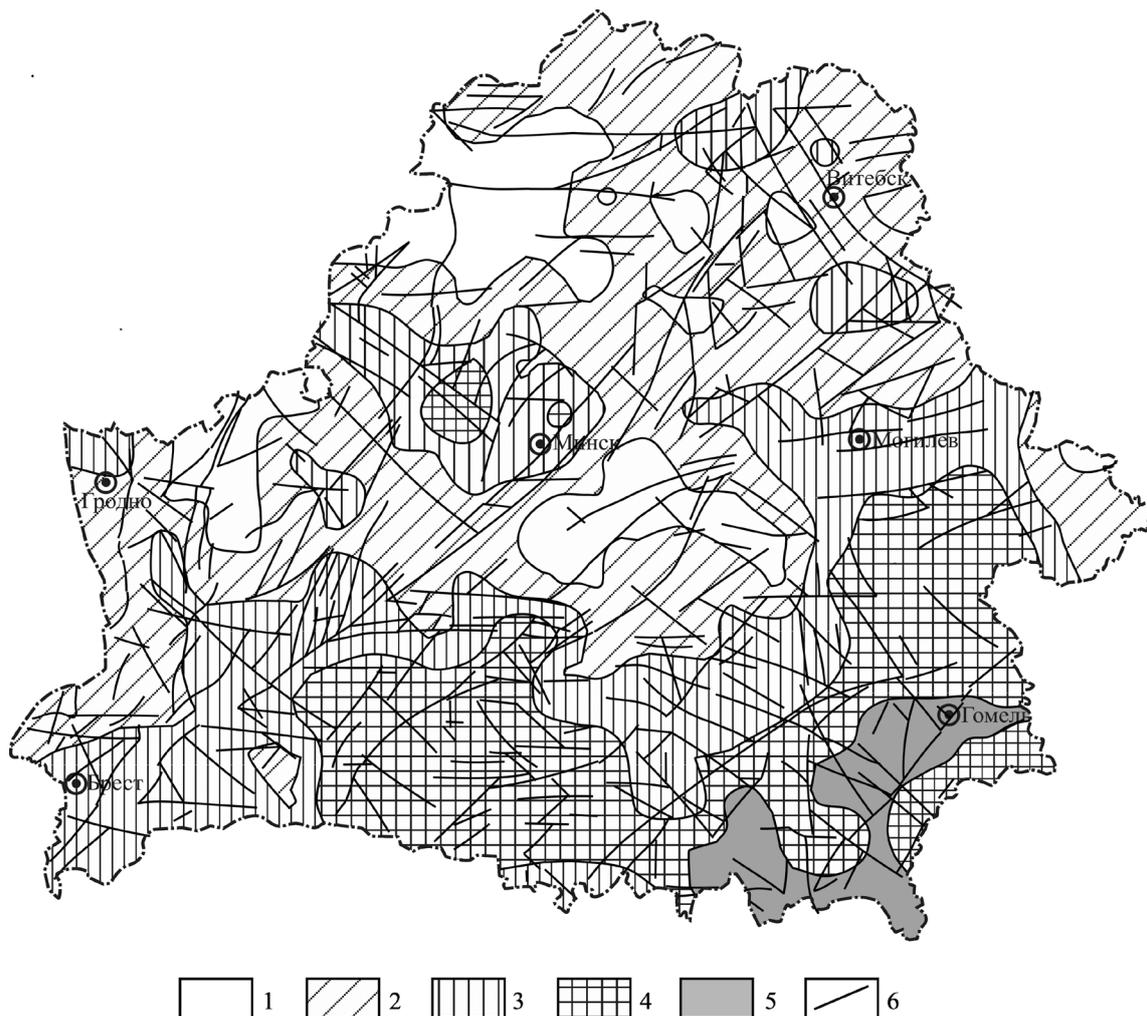
Для определения неблагоприятных последствий проявления природных и природно-антропогенных опасностей выбраны следующие критерии (с оценкой в условных баллах): повторяемость процесса (примерно раз в столетие – 1, раз в несколько лет – 2, сезонная – 3, постоянная – 4), площадь проявления (локальная – 1, примерно в пределах административного района – 2, субрегиональная – 3), влияние на здоровье населения (незначительное – 1, повышенное – 2, высокое – 3, с тяжелыми последствиями – 5), материальные затраты на минимизацию нарушений природно-техногенных комплексов (незначительные – 1, умеренные – 2, повышенные – 3, разрушение – 5), степень нарушенности природных комплексов (незначительная – 1, средняя – 2, сильная – 3, формирование «бедленды» – 5), загрязнение территории (среднее – 3, высокое – 5, зона эколого-геохимического кризиса – 7). Следует отметить, что выбор этих критериев и их балльная оценка в последствии при более детальных работах могут быть уточнены. По перечисленным показателям охарактеризованы все основные виды опасностей литосферного класса (таблица).

Установленные по перечисленным критериям предполагаемые последствия проявления экстремальных форм современной геодинамики наносились на обобщенную схему их проявления, которая была разбита на систему из 553 квадратов площадью по 400 км² каждый. В пределах этих квадратов рассчитывались средние значения всех картируемых показателей, которые относились к центрам квадратов и по этим величинам составлялась схема районирования территории Беларуси по возможным неблагоприятным последствиям реализации природных и природно-антропогенных опасностей.

Результаты и их обсуждение. Всего выделено 6 следующих таксонов территории: с незначительной (суммарная оценка до 5 баллов), умеренной (6–15 баллов), повышенной (16–26 баллов), высокой (26–35 баллов), весьма высокой (более 35 баллов) и весьма высокой в зонах активных разломов (более 35 баллов) степени неблагоприятных последствий современных геологических процессов. На площадях с незначительными последствиями проявления геодинамики происходят локальные ухудшения качества и изредка нарушения природных комплексов

**Степень неблагоприятности проявления природных и природно-антропогенных опасностей
литосферного класса**
The degree of adverse manifestations of nature and nature-anthropogenic hazards of the lithospheric class

Вид (комплекс) опасностей Type (complex) of hazards	Оценка неблагоприятности проявления (в баллах) Assessment of unfavorable consequences of manifestation (in points)						
	Повторяе- мость Periodicity	Площадь проявле- ния Area of mani- fes- tation	Влияние на здоровье населения Impact on public health	Материальные затраты на минимизацию последствий Material costs for minimizing the consequences	Нарушенность природных комплексов Disturbances of nature complexes	Загрязнение территории, включая формирование аномалий геофизических полей Territory contamination including the formation of anomalies of geophysical fields	Суммарная оценка Total assessment
<i>Сейсмичность</i>							
До 5 баллов	2	1	–	–	–	–	3
5–6 баллов	2	1	1	2	–	–	6
6–7 баллов	1	1	2	2	1	–	7
Более 7 баллов	1	2	2	2	1	1	10
<i>Геодинамические процессы в зонах активных разломов</i>							
Локальных	4	1	4	3	–	4	16
Региональных	4	2	4	3	–	5	18
Суперрегиональных	4	3	4	3	–	5	19
<i>Овражная эрозия</i>							
Умеренная	3	1	–	1	1	–	6
Интенсивная	3	1	–	1	2	1	7
<i>Плоскостная эрозия</i>							
4–6 мм/год	3	2	–	2	–	1	8
Более 6 мм/год	3	1	–	2	–	1	7
<i>Пыльные бури</i>							
Повышенной интенсивности	2	3	1	2	1	1	10
Высокой интенсивности	2	3	1	2	1	2	11
<i>Селеподобные потоки</i>							
	2	1	–	1	1	1	6
<i>Подтопление</i>							
	3	3	1	1	1	1	10
<i>Смещение отложений гравитационными процессами</i>							
Десятки м ³	3	1	–	1	1	–	6
Сотни м ³	3	1	–	1	1	–	6
Тысячи м ³	3	1	1	1	2	–	8
<i>Карст</i>							
	3	1	–	1	1	–	6
<i>Суффозия, количество западин</i>							
25–40 шт/км ²	1	2	–	1	1	–	5
Более 40 шт/км ²	1	2	–	2	2	–	7
<i>Интегральная оценка интенсивности проявления экзогенных процессов</i>							
До 400 т/км ² /год	3	3	–	1	1	1	9
Более 400 т/км ² /год	3	3	–	1	1	1	9
<i>Техногенная нагрузка на земную поверхность</i>							
До 50 тыс. м ³ /км ²	4	2	1	–	1	1	9
До 350 тыс. м ³ /км ²	4	2	1	–	2	1	10
Около 1 млн м ³ /км ²	4	1	1	–	3	3	12
Более 1 млн м ³ /км ²	4	1	2	–	5	5	17
<i>Интегральная оценка интенсивности проявления техногенных процессов</i>							
Более 300 т/км ² /год	4	1	–	–	1	–	6
<i>Загрязнение территории</i>							
Повышенное	4	2	3	2	2	2	15
Высокое	4	1	5	3	3	5	21
Участки эколого-геохимического кризиса	4	1	5	3	3	7	23



Районирование территории Беларуси по степени неблагоприятных последствий проявления природных и природно-антропогенных опасностей литосферного класса. Степень неблагоприятности (оценка в баллах): 1 – незначительная (1–5), 2 – умеренная (6–15), 3 – повышенная (16–25), 4 – высокая (26–35), 5 – весьма высокая (более 35), 6 – весьма высокая (более 35) в зонах активных разломов

The regionalization of the territory of Belarus by the degree of adverse manifestations of nature and nature-anthropogenic hazards of the lithospheric class. The degree of adverse (estimation in points): 1 – insignificant (1–5), 2 – moderate (6–15), 3 – increased (16–25), 4 – high (26–35), 5 – very high (more than 35), 6 – very high (more than 35) in the zones of active faults

и сельскохозяйственных угодий, ограниченные по площади несколько вышекларковые загрязнения покровных отложений, воздействие на здоровье населения маловероятно.

Для территорий с умеренными неблагоприятными последствиями развития опасностей возможно частичное изменение, ухудшение качества, локальное разрушение природных комплексов и сельскохозяйственных угодий, заметно вышекларковое загрязнение покровных отложений, редкое проявление различного типа аварий, временное ухудшение состояния здоровья населения, что сопровождается незначительным или умеренным материальным ущербом.

На территориях с повышенной степенью неблагоприятных последствий экстремальных геологических процессов происходит существенное изменение, ухудшение качества и локальное разрушение природных комплексов и сельскохозяйственных угодий, загрязнение до около предельно допустимых концентраций отдельных элементов в покровных отложениях и подземных водах, возрастание числа различного типа аварий, вышефоновая заболеваемость населения, для минимизации ущерба требуются умеренные материальные затраты (рисунок).

Участки с высокой степенью неблагоприятности проявления современной геодинамики характеризуются деградацией и частичным разрушением природных комплексов и сельскохозяй-

ственных угодий, загрязнением до выше предельно допустимых концентраций отдельных элементов в покровных отложениях и подземных водах, значительным увеличением заболеваемости населения и различного типа аварий, что предполагает и повышенные материальные затраты для минимизации деформаций природно-антропогенных комплексов.

И наконец, на площадях с очень высокой степенью неблагоприятных последствий экстремальных геологических процессов происходит разрушение (до локального образования «бедленда») природных комплексов, существенное ограничение в использовании сельскохозяйственных угодий, загрязнение выше предельно допустимых концентраций покровных отложений и подземных вод комплексом элементов, существенный рост заболеваемости населения и различного типа аварий. Для снижения неблагоприятных последствий разрушения и деформаций природно-антропогенных комплексов необходимы высокие материальные затраты.

Заключение. На территории Беларуси достаточно разнообразно проявляются современные геологические процессы, экстремальные формы которых могут рассматриваться в качестве природных и природно-антропогенных опасностей литосферного класса. По степени неблагоприятности последствий их развития проведено районирование территории региона с выделением шести категорий площадей, различающихся по уровню нарушенности природных комплексов, сельскохозяйственных угодий, инженерных сооружений, загрязненности покровных отложений, заболеваемости населения, частоте аварий различного типа и размеру материальных затрат, которые необходимы для минимизации последствий реализации опасностей.

Благодарности. Исследования особенностей проявления природных и природно-антропогенных опасностей были проведены при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований и Национальной академии наук Украины (грант X15YK/A–009).

Acknowledgements. Studies of the manifestation of natural and natural-anthropogenic dangers were carried out with the support of the Belarusian Republican Foundation of Fundamental Research and National Academy of Sciences of Ukraine (grant X15YK/A–009).

Список использованных источников

1. Осипов, В. И. Природные опасности и риски на пороге XXI века / В. И. Осипов // *Стратегия гражданской защиты: проблемы исследования*. – 2012. – Т. 2, вып. 2. – С. 836–846.
2. Калинин, М. Ю. Чрезвычайные ситуации и их последствия: мониторинг, оценка, прогноз и предупреждение / М. Ю. Калинин, А. А. Волчек, П. В. Шведовский. – Минск: Белэкс, 2010. – 275 с.
3. Матвеев, А. В. Особенности современного морфогенеза на территории Беларуси / А. В. Матвеев // *Вопросы географии*. – М.: Изд. дом «Кодекс», 2015. – Сб. 140: Современная геоморфология. – С. 380–385.
4. Матвеев, А. В. Опасные эндогенные процессы на территории Беларуси / А. В. Матвеев // *Геология и минерально-сырьевые ресурсы запада Восточно-Европейской платформы: проблемы изучения и рационального использования: материалы Междунар. науч. конф., посвящ. 215-летию со дня рождения И. Домейко (Минск, 31 июля – 3 августа 2017 г.)*. – Минск: СтройМедиаПроект, 2017. – С. 188–191.
5. Матвеев, А. В. Природные и природно-антропогенные опасности экзогенного типа на территории Беларуси / А. В. Матвеев // *Актуальные проблемы наук о Земле: использование природных ресурсов и сохранение окружающей среды: сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. Году науки в Республике Беларусь, Брест, 25–27 сентября 2017 г.: в 2 ч.* – Брест: БрГУ, 2017. – Ч. 1. – С. 12–15.
6. Исследование опасностей и рисков чрезвычайных ситуаций в Украине / Л. Г. Руденко [и др.] // *Природопользование*. – 2016. – Вып. 29. – С. 21–29.
7. Матвеев, А. В. Геохимия четвертичных отложений Беларуси / А. В. Матвеев, В. Е. Бордон. – Минск: Белорусская наука, 2013. – 191 с.
8. Палиенко, В. П. Геоморфологические и геодинамические природные и природно-антропогенные опасности и риски: проблемы выявления и изучения / В. П. Палиенко // *Вопросы географии*. – М.: Изд. дом «Кодекс». – Сб. 140: Современная геоморфология. – С. 307–319.
9. Палиєнко, В. П. Концептуальні засади оцінки еколого-неогеодинамічного ризику / В. П. Палиєнко // *Мат. симп. «Геомоніторинг-99»*. – Моршин; Львів, 1999. – С. 70–73.
10. Руденко, Л. Г. Оцінювання й картографування ризиків виникнення надзвичайних ситуацій в Україні – Європейський контекст / Л. Г. Руденко, О. Л. Дронова // *Український географічний журнал*. – 2014. – № 1. – С. 53–60.
11. Рудько, Г. І. Наукові та методичні основи оцінки геоморфологічного ризику території / Г. І. Рудько // *Фізична географія та геоморфологія*. – 2006. – Т. 51. – С. 86–93.
12. Матвеев, А. В. Интегральная оценка особенностей проявления современных экзогенных геологических процессов на территории Беларуси / А. В. Матвеев // *Природопользование*. – 2014. – Вып. 25. – С. 131–138.

References

1. Osipov V. I. Nature dangers and risks on the edge of XXI century. *The strategy of civil safety: study problems*, 2012, vol. 2, no. 2, pp. 836–846 (in Russian).

2. Kalinin M. Yu., Volchek A. A., Shvedovskij P. V. *Emergency situations and their consequences: monitoring, estimation, forecast and warning*. Minsk, Belsens Publ., 2010. 275 p. (in Russian).
3. Matveev A. V. Peculiarities of modern morphogenesis on the territory of Belarus. *Voprosy geografii. Sb. 140: Sovremennaya geomorfologiya* [Geographic issues. Collection 140: Modern Geomorphology]. Moscow, Publishing House «Kopecks», 2015, pp. 380–385 (in Russian).
4. Matveev A. V. Dangerous endogenic processes on the territory of Belarus. *Geologiya i mineral'no-syr'evye resursy zapada Vostochno-Evropeiskoi platformy: problemy izucheniya i ratsional'nogo ispol'zovaniya: materialy Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii, posvyashchennoi 215-letiyu so dnya rozhdeniya I. Domeiko (Minsk, 31 iyulya – 3 avgusta 2017 g.)* [Geology and mineral raw materials of the West of Eastern European platform: problems of rational nature management study. International Scientific Conference dedicated to the 215 anniversary from the day of I. Domeyko (Minsk, July, 31 – August, 03 2017)]. Minsk, StroiMediaProekt Publ., 2017, pp. 188–191 (in Russian).
5. Matveev A. V. Nature and nature-anthropogenic dangers of exogenous type on the territory of Belarus. *Aktual'nye problemy nauk o Zemle: ispol'zovanie prirodnikh resursov i sokhranenie okruzhayushchei sredy: sbornik materialov Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, posvyashchennoi Godu nauki v Respublike Belarus', Brest, 25–27 sentyabrya 2017 g. Ch. I* [Actual problems of earth's sciences: nature resources use and environment conversation. International Scientific and Practical Conference, Brest, September, 25–27, 2017. Part 1]. Brest, Brest State University, 2017, pp. 12–15 (in Russian).
6. Rudenko L. G., Palienko V. P., Spica R. A., Zhovinskij Eh. Ya., Kryuchenko N. O. The research of threats and risks of the emergency situations in Ukraine. *Prirodopol'zovanie* [Nature Management], 2016, vol. 29, pp. 21–29 (in Russian).
7. Matveev A. V., Bordon V. E. *Geochemistry of the quaternary sediments of Belarus*. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ., 2013. 191 p. (in Russian).
8. Palienko V. P. Geomorphological and geodynamical nature and nature-anthropogenic dangers and risks: detection and study problems. *Voprosy geografii. Sbornik 140: Sovremennaya geomorfologiya* [Geographical issues. Coll. 140: Modern geomorphology]. Moscow, Publishing House «Kodeks», 2015, pp. 307–319 (in Russian).
9. Palienko V. P. The conceptual bases of the estimation of ecological and neogeodynamical risk. *Materialy simpoziuma «Geomonitoring-99»* [Material Symposium “Geomonitoring-99”]. Morshyn, Lviv, 1999, pp. 70–73 (in Ukraine).
10. Rudenko L. G., Dronova O. L. The estimation and mapping of the risks of emergency situations in Ukraine appearance – European context. *Ukrains'kij geografichnij zhurnal* [Ukrainian geographical journal], 2014, no. 1, pp. 53–60 (in Ukraine).
11. Rud'ko G. I. Scientific and methodical bases of the estimation of geomorphological territory risk. *Fizichna geografiya ta geomorfologiya* [Physical geography and geomorphology], 2006, vol. 51, pp. 86–93 (in Ukraine).
12. Matveev A. V. The integral evaluation features of displays of modern exogenous processes on the territory of Belarus. *Prirodopol'zovanie* [Nature Management], 2014, vol. 25, pp. 131–138 (in Russian).

Информация об авторе

Матвеев Алексей Васильевич – академик, д-р геол.-минералог. наук, гл. науч. сотрудник. Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220114, Минск, Республика Беларусь). E-mail: matveyev@ecology.basnet.by.

Information about the author

Matveyev Alexey Vasilievich – Academician, D. Sc. (Geology), Chief researcher. Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoryna Str., 220114, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: matveyev@ecology.basnet.by.

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

УДК 552.14:551.734.3/.5(476-13)
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-3-335-340>

Поступило в редакцию 26.03.2018
Received 26.03.2018

С. М. Обровец¹, И. А. Яшин²

¹Научно-производственный центр по геологии, Минск, Республика Беларусь

²Белорусский научно-исследовательский проектный институт нефти, Гомель, Республика Беларусь

О НЕТРАДИЦИОННЫХ НЕФТЕГАЗОПЕРСПЕКТИВНЫХ КОЛЛЕКТОРАХ МЕЖСОЛЕВОГО КОМПЛЕКСА ПРИПЯТСКОГО ПРОГИБА

(Представлено членом-корреспондентом Р. Е. Айзбергом)

Аннотация. В нижнефаменских межсолевых отложениях Припятского прогиба (Беларусь) присутствуют породы доманикового типа, слоистой микротекстуры, сложного минерального состава, содержащие остатки радиолярий, органическое вещество сапропелевого типа, нефтепроявления, поры от растворенных радиолярий, трещины автофлюидо-разрывов и ослабленные зоны, возникшие при вторичных преобразованиях. Эти породы в отложениях Центрального ареала прогиба могли быть нефтегазопроизводящими и содержащими нетрадиционные залежи углеводородов.

Ключевые слова: Беларусь, Припятский прогиб, нижнефаменские отложения, доманикиты, минеральный состав, углеводороды

Для цитирования: Обровец, С. М. О нетрадиционных нефтегазоперспективных коллекторах межсолевого комплекса Припятского прогиба / С. М. Обровец, И. А. Яшин // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 3. – С. 335–340. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-3-335-340>

Svetlana M. Abravets¹, Igory A. Yashin²

¹Research and Production Centre for Geology, Minsk, Republic of Belarus

²Belarusian Research Design Institute of Petroleum, Gomel, Republic of Belarus

NON-TRADITIONAL OIL AND GAS-PERSPECTIVE RESERVOIRS OF THE INTER-SALT COMPLEX OF THE PRIPYAT TROUGH

(Communicated by Corresponding Member Romma E. Aizberg)

Abstract. Lower Famennian inter-salt deposits (Belarus) have been studied comprehensively. The microlithofacies are as follows: laminated organic-carbonate-silica rock; massive limestone; radiolarite; algal limestone; massive dolomite; porous dolomite; dolomite of indistinct lumpy texture. Rocks contain pores of dissolved radiolarians, cracks of fluid auto-fracturing and weakened zones encountered in the secondary transformations. Rocks of Domanic type in the Central oil area of the Pripyat can be oil-bearing and oil-generating ones.

Keywords: Belarus, Pripyat Trough, Early-Famennian, domanik-type rocks, microlithofacies, oil-bearing, oil-generating

For citation: Abravets S. M., Yashin I. A. Non-traditional oil and gas-perspective reservoirs of the inter-salt complex of the Pripyat trough. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2018, vol. 62, no. 3, pp. 335–340 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-3-335-340>

Введение. В Припятском прогибе Беларуси межсолевой нижнефаменский комплекс Центрального ареала является важным объектом изучения литолого-минералогического состава пород, образующих нетрадиционные низкопроницаемые резервуары углеводородов. Эти резервуары сложены преимущественно тонкослоистыми глинисто-карбонатными, карбонатными или кремнеземно-карбонатными породами, которые в англоязычной литературе рассматриваются в качестве tight reservoir. В Припятском прогибе породы доманикоидного облика (доманиковые) были ранее отмечены как депрессионные литофации в задонских отложениях [1]. Доманиковые фации присутствуют во многих нефтегазоносных регионах, а залежи углеводородов в подобных отложениях разрабатываются в Днепровско-Донецкой впадине [2], в Камско-Кинельской системе впадин [3; 4], Сибири [5; 6] и других нефтегазоносных регионах.

Они характеризуются рядом особых признаков, отличных от традиционных карбонатных и терригенных резервуаров нефти и газа. К таким отличиям относятся прежде всего литолого-минералогический и геохимический состав, структурно-текстурные особенности пород, микро- и наноразмерность кристаллов и межзернового пространства, каналов, трещин, пор и каверн матрицы, а также анизотропные условия их размещения.

В межсолевых отложениях Центрального ареала Припятского прогиба эти породы по данным ГИС традиционно интерпретируемые как глинистые, воспринимаются в качестве региональных флюидоупоров. Однако в разрезе отложений межсолевого комплекса Центрального ареала встречаются зоны с различными фильтрационно-емкостными характеристиками и нефтепроявлениями в керне. Появление зон эффективных коллекторов связано с минеральным составом и особенностями формирования пород доманикового типа, которое происходило на определенных участках палеобассейна в условиях относительно глубоководных обстановок с высокой биопродуктивностью [7; 8]. Понимание литологии, минерального состава, текстурно-структурных особенностей и коллекторских свойств определяет новое направление поисков этих перспективных на углеводороды отложений в межсолевом комплексе Припятского прогиба.

Материалы и методы исследования. Породы доманикового типа в межсолевом комплексе Припятского прогиба были детально исследованы с использованием петрографического, спектрального, рентгеноструктурного, электронно-микроскопического методов, а также определения С-органического и коллекторских свойств. В результате было выявлено, что эти образования представляют собой четырехкомпонентную смесь, основными компонентами по мере убывания являются: кальцит, аутигенный кварц, кремнезем, доломит, гидрослюда, органическое вещество, пирит. Они формируют породы слоистой макро- и микротекстуры, органо-глинисто-кремнисто-карбонатного, органо-кремнисто-глинисто-карбонатного и органо-глинисто-карбонатно-кремнистого состава, содержащие в различном количестве остатки радиолярий [8]. По своему минеральному составу породы доманикового типа Припятского прогиба располагаются на треугольной диаграмме, где группы II и III представлены типичными доманикитами [9], которые обогащены органическим веществом и имеют значительные содержания аутигенного кремнезема и карбонатов. Это породы коанамской свиты Восточной Сибири (II) и доманикитов Тимано-Печорского региона (III) (рис. 1, *a*). Они отличаются от «сланцевых» пород в отложениях Северо-Американского региона (рис. 1, *b*) [10].

По петрографическим описаниям шлифов этих пород, согласно методике [11], выделены основные микролитофации, отражающие вещественный состав, структурно-текстурные и генетические особенности пород (рис. 2, *a*): 1 – органо-карбонатно-кремнеземная с тонкослоистой ми-

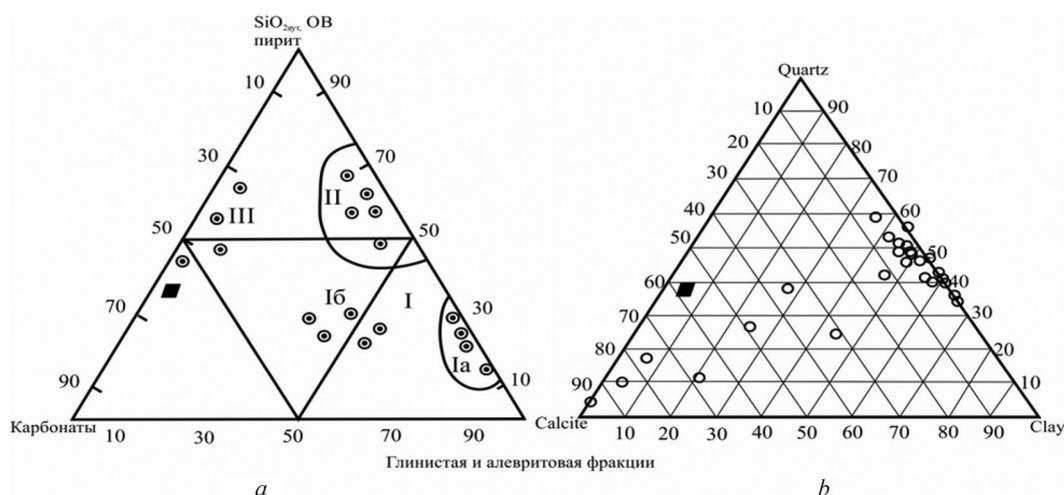
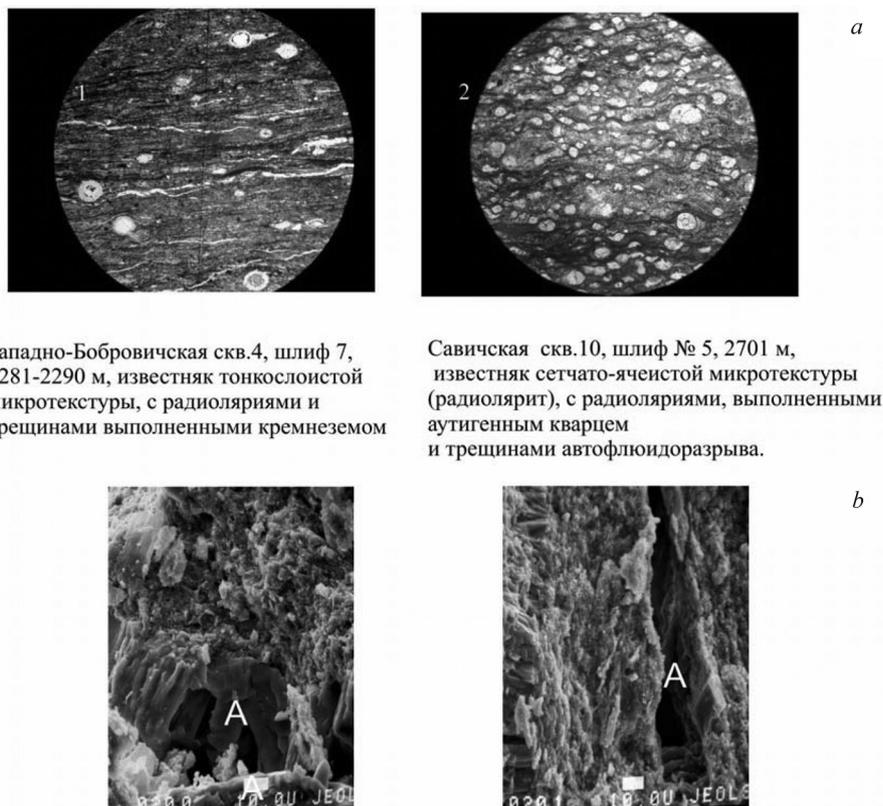


Рис. 1. Характеристика компонентного состава «сланцевых» пород и доманикитов по тройной диаграмме: *a* – доманикиты из разных групп [9]; *b* – «сланцевые» породы [10], породы доманикового типа Припятского прогиба (■)

Fig. 1. Characteristics of the component composition of the “shale” rocks and domanicamites according to the triple diagram: *a* – domanicamites from different groups [9]; *b* – “shale” rocks [10], rocks of the domanicamites type of the Pripyat trough (■)



Западно-Бобровицкая скв.4, шлиф 7, 2281-2290 м, известняк тонкослоистой микротекстуры, с радиоляриями и трещинами выполненными кремнеземом

Савицкая скв.10, шлиф № 5, 2701 м, известняк сетчато-ячеистой микротекстуры (радиолярит), с радиоляриями, выполненными аутигенным кварцем и трещинами автофлюидоразрыва.

Рис. 2. *a* – фотографии шлифов домаников, содержащих радиолярии в задонско-петриковских отложениях; *б* – электронно-микроскопические снимки образцов пород в Савицкой скв. 10 + 90; А – поры с аутигенными кристаллами кварца. Сканирующий электронный микроскоп Jeol. Увеличение 660

Fig. 2. *a* – photographs of polished sections of the domanik-type rocks containing radiolarians in the Zadonsko-Petrikov deposits; *b* – electron microscopic images of rock samples in boreholes Savichskaya 10 + 90; А – pores with authigenic quartz crystals. Scanning electron microscope Jeol. Magnification 660

кротекстурой; 2 – известняк с массивной микротекстурой; 3 – радиолярит; 4 – известняк водорослевый с пятнистой микротекстурой; 5 – доломит с массивной микротекстурой; 6 – доломит пористый, с кружевной микротекстурой; 7 – доломит с неяснокмковатой микротекстурой. Эти микролитофации с остатками радиолярий в различных наборах со слоями пород без остатков радиолярий присутствуют в разрезах скважин независимо от их возрастной и латеральной принадлежности.

В породах доманикового типа межсолового комплекса Припятского прогиба по петрографическим исследованиям можно видеть, что пористость сформирована в результате вторичных процессов: 1 – пустоты выщелачивания скелетов радиолярий или частичного метасоматического замещения скелетного остатка; 2 – пустоты выщелачивания ископаемой макрофауны; 3 – пустоты за счет перераспределения карбонатного и кремнеземного компонентов породы; 4 – пустоты выщелачивания карбонатного материала из стенок трещин (порообразные расширения трещин, обусловленные перемещением по ним флюидов); 5 – внутрислоевые горизонтальные трещины; 6 – микрозернистые и нанозернистые пустоты между кристаллами карбонатов и кварца; 7 – «органическая пористость» – поры от растворенной органики; 8 – трещины и поры тектонических напряжений, которые, по мнению Лукина [13] могут быть связаны с сейсмическими и флюидодинамическими процессами.

Результаты и их обсуждение. В межсоловом синрифтовом бассейне Припятского прогиба [8] соотношение компонентов в составе осадка менялось в зависимости от гидродинамики, рельефа дна бассейна, климатических изменений. Осадки, сформировавшие породы доманикового типа и содержащие остатки радиолярии, образовались в наиболее углубленных частях бассейна (ложбинах в рельефе) в приразломных депрессиях, на склонах моноклиналей, на участках, уда-

ленных от онколитовых отмелей (зон развития водорослевого карбонатообразования), и незначительного поступления терригенного материала с областей сноса. Эти локальные ложбины испытывали дефицит осадочного материала. Придонные воды, стекавшие с приподнятых возвышенностей, были насыщены карбонатной «мутью» и смешивались с более глубинными, обогащенными кремнеземом. Эти воды имели большую плотность, что затрудняло свободный водообмен, приводивший к нехватке кислорода, а выпадение разлагающегося планктона – к образованию застойной восстановительной среды. Осадки формировались в эвксинных условиях, ниже уровня окисления и базиса волновой деятельности. В таких ложбинах Припятского бассейна сформировались маломощные (3 мм – 7 см) слои пород доманикового типа с различным содержанием остатков радиолярий и высокими содержаниями Сорг. Развитие активной органической жизни в палеобассейне особенно радиолярий, присутствие кремнезёма органического и хемогенного генезиса в составе пород доманикового типа, вероятно, определялись поступлением гидротермальных флюидов [12], богатых различными солями и микрокомпонентами, а также содержащих растворённый кремнезём. Возможно, важным фактором, определяющим зрелость органического вещества в этих породах, являлся разогрев его синрифтовыми гидротермальными флюидами. Этот процесс приводит к образованию подвижной фазы углеводородов, куда переходит и содержащаяся в органическом веществе активность. Подвижная фаза углеводородов могла удаляться из места её образования под действием тех же гидротермальных флюидов или сохраняться *in situ* в этих же отложениях в процессе литификации осадка.

Эти отложения в начале диагенеза обладали высокой пористостью и хорошей проницаемостью, благодаря тому, что радиолярии в осадке чаще всего были не конформны друг другу. Прослои, насыщенные радиоляриями, были более плотными и устойчивыми к геостатическому давлению при погружении. Влияние вторичных преобразований на формирование коллекторов в этих породах проявилось вследствие неоднократных растворов и замещений первичного порового пространства и радиолярий кремнистым или карбонатным веществом. При формировании доломитов, радиолярии осаждались совместно с карбонатным осадком. Между остатками радиолярий и кристаллами доломитов, которые расположены как бы свободно (рыхло), сохранялось низкопроницаемое поровое пространство. Судя по описаниям микролитофаций известняков, наряду с радиоляриями происходило осаждение тонкозернистой кальцитовой матрицы. Позже по радиоляриям развивались среднезернистые кристаллы кальцита, более крупные, чем в общей тонкозернистой матрице. Такие кальцитовые породы могут быть проницаемыми для флюидов за счет большого количества микротрещин, образовавшихся в результате перекристаллизации кальцита. Таким образом, можно предположить, что во всех описанных микролитофациях пород, содержащих значительное количество остатков радиолярий, кроме пустот (пор) от растворенных раковин радиолярий присутствуют ослабленные зоны, локализирующие участки образования трещин, формируя микрокристаллическую трещиноватость.

Слойки пород доманикового типа, переслаиваясь со слойками известняков (в том числе известняков глинистых) без остатков радиолярий, создавали слоистые макро- и микротекстуры породы, слоистость которых часто проявляется ориентированным расположением буро-коричневых гелефицированных пропластков органического генезиса. В ряде случаев между этими пропластками встречаются горизонтальные свободные трещины, а также трещины, выполненные тонкозернистым кварцем, волокнистым кремнеземом, трещины автофлюидоразрывов, заполненные светло-оранжевой нефтью.

Коллекторские свойства пород доманикового типа отличаются от наиболее распространенных в Припятском прогибе карбонатных органических коллекторов, так как они представлены первичными микро- и наноколлекторами. Большое значение для формирования коллектора в этих породах имеет содержание кремнезема, которое повышает хрупкость и способность пород к формированию низкопроницаемых трещин и пор. Результаты электронно-микроскопического анализа (рис. 2, *b*) позволяют сделать вывод, что на структуру пустотного пространства большое влияние также оказала минеральная форма кремнезема в виде кристаллов кварца. Именно значительное содержание кремнезема, видимое в шлифах в виде линзочек, миллиметровых слоечков, кремнисто-карбонатной матрицы, скелетных остатков радиолярий и аутигенного

кварца повышает хрупкость пород, и их способность к трещинообразованию и возникновению вторичной пористости, создающей порово-трещинный коллектор.

Названные типы пустот в породах доманикового типа в отложениях межсолевого комплекса Центрального района распределены неравномерно. Доля их в эффективной пористости коллектора определяется вещественным составом каждого слоя этой тонкослоистой породы, обусловленной микрозональностью условий их осадконакопления. Наиболее равномерное распределение пустотных структур (в том числе межкристалльных и «пустых» трещин) возникло на ранней стадии диагенеза осадка.

Нетрадиционные коллекторы трещинного, кавернозно-трещинного и трещинно-кавернозно-порового типов приурочены преимущественно к глинисто-карбонатно-кремнистым разновидностям и радиоляритам. Такие породы в Центральном нефтеперспективном ареале могут быть новым типом порово-трещинного коллектора.

Заключение. Следует отметить выявленные различия и сходство минерального состава пород доманикового типа Тимано-Печорского бассейна, Припятского прогиба и баженовской свиты Сибири. На территории Припятского прогиба в разрезе межсолевого комплекса породы доманикового типа распространены локально, так как они формировались в рифтовом бассейне с сильно дифференцированным рельефом. Породы баженовской свиты Сибири и доманикового горизонта Тимано-Печорского бассейна распространены на значительных территориях иных тектонических структур.

В породах баженовской свиты тонкозернистый хемогенный кальцит практически отсутствует, а в отложениях доманика Тимано-Печорского региона [9], как и в породах доманикового типа Припятского прогиба, он является основным породообразующим компонентом. Кремнезем в породах баженовской свиты имеет исходное биогенное происхождение, а в доманике преимущественно хемогенное, в породах Припятского прогиба – биогенно-хемогенное. Органическое вещество в отложениях доманика Тимано-Печорского региона и Припятского прогиба имеет преимущественно сапропелевый генезис, тогда как в породах баженовской свиты встречаются и гумусовые компоненты.

Определенные в Припятском прогибе в полостях остатков раннефаменских радиолярий вытянутые пирамидально-призматические кристаллы кварца могут служить дополнительным диагностическим критерием выделения поздней стадии катагенеза пород межсолевого комплекса (от 120 до 180 °С), отвечающим в основном, главной фазе нефтегазообразования.

При обработке материалов по ГИС отложений межсолевого комплекса по Центральному ареалу необходимо учитывать в расчетах карбонатную, кремнистую и органическую составляющую пород доманикового типа, и в незначительной составляющей глинистый материал. При разработке залежей углеводородов в отложениях, где отмечены породы доманикового типа, необходимо в композитных растворах учитывать минеральный состав этих пород.

Список использованных источников

1. Кручек, С. А. Нижнефаменские отложения Припятского прогиба / С. А. Кручек. – Минск, 1975. – 30 с.
2. Породы-коллекторы нефти и газа визейских рифовых сооружений Срибненской депрессии Днепровско-Донецкой впадины / О. В. Куровец [и др.] // Геология рифов. – 2005. – С. 100–102.
3. Проворов, В. М. Особенности строения и нефтегазоносности верхнедевонских – турнейского палеошельфа северных и западных районов Урало-Поволжья / В. М. Проворов // Геология нефти и газа. – 1992. – № 2. – С. 26–30.
4. Петренко, Е. Л. Особенности строения доманиково-турнейского комплекса в южной части Денисовской впадины в связи с перспективами нефтегазоносности / Е. Л. Петренко // Геология рифов. – 2002. – С. 127–130.
5. Бахтуров, С. Ф. Доманикоидные отложения кембрия востока Сибирской платформы / С. Ф. Бахтуров, В. С. Переладов // Доманикиты Сибири и их роль в нефтегазоносности. – Новосибирск, 1982. – С. 118–127.
6. Таруц, Г. М. Строение нефтегазоносных отложений баженовской свиты Западно-Сибирской плиты в связи с особенностями тектоники верхнеюрского бассейна осадконакопления (на примере Салымского района) / Г. М. Таруц, Е. А. Гайдебурова // Цикличность осадконакопления нефтегазоносных бассейнов и закономерности размещения залежей. – Новосибирск, 1978. – С. 80–97.
7. Обровец, С. М. Нефтеперспективные доманиковые фации в межсолевых девонских отложениях Центрального района Припятского прогиба / С. М. Обровец, И. А. Яшин // Литосфера. – 2011. – № 2(35). – С. 85–96.
8. Обровец, С. М. Особенности формирования и распространения девонских отложений с остатками радиолярий в Припятском прогибе / С. М. Обровец, И. А. Яшин // Литосфера. – 2011. – № 1(34). – С. 82–93.

9. Нефтегазообразование в отложениях доманикового типа / С. Г. Неручев [и др.]. – Л.: Недра, 1986. – 247 с.
10. Unconventional Shale-Gas Systems: The Mississippian Barnett Shale of North-Central Texas as One Model for Thermogenic Shale-Gas Assessment / D. M. Jarvie [et al.] // American Association of Petroleum Geologists Bulletin. – 2007. – Vol. 91, N 4. – P. 475–499. <https://doi.org/10.1306/12190606068>
11. Уилсон, Дж. Л. Карбонатные фации в геологической истории / Дж. Л. Уилсон; пер. с англ. – М.: Недра, 1980. – 463 с.
12. Обровец, С. М. Фаменский вулканизм и его влияние на седиментогенез в Припятском бассейне зрелой фазы рифтогенеза / С. М. Обровец // Литосфера. – 2016. – № 2(45). – С. 48–57.
13. Лукин, А. Е. О природе трещиноватости нефтегазоносных пород-коллекторов с низкопроницаемой матрицей / А. Е. Лукин // Доповіді Національної академії наук України. – 2015. – № 6. – С. 114–122.

References

1. Kruchek S. A. *Nizhnefamensky deposits of the Pripyat Trough*. Minsk, 1975. 30 p. (in Russian).
2. Kurovec O. V., Sheremet P. S., Chepusenko A. Sh., Knishman A. Sh., Perit T. M. Breeding reservoirs of oil and gas in the Visean reef structures of the Sribnenskaya depression of the Dnieper-Donets basin. *Geologiya rifov [Geology of reefs]*, 2005, pp. 100–102 (in Russian).
3. Provorov V. M. Features of the structure and oil and gas content of the Upper Devonian – Tournaisian paleoshelf of the northern and western regions of the Ural-Volga region. *Geologiya nefiti i gaza = Oil and Gas Geology*, 1992, no. 2, pp. 26–30 (in Russian).
4. Petrenko E. L. Peculiarities of the structure of the Domanovo-Turney complex in the southern part of the Denisovskaya depression in connection with the prospects of oil and gas potentia. *Geologiya rifov [Geology of reefs]*, 2002, pp. 127–130 (in Russian).
5. Bahturov S. F., Pereladov V. S. Dominicoid deposits of the Cambrian East of the Siberian Platform. *Domanikity Sibiri i ikh rol' v neftegazonosnosti [Domanic-type rocks of Siberia and their role in oil- and gas-bearing capacity]*. Novosibirsk, 1982, pp. 118–127 (in Russian).
6. Taruc G. M., Gajdeburova E. A. The structure of the oil and gas bearing deposits of the Bazhenov suite of the West Siberian plate in connection with the features of the tectonics of the Upper Jurassic sedimentation basin (by the example of the Salym region). *Tsiklichnost' osadkonakopleniya neftegazonosnykh basseinov i zakonmernosti razmeshcheniya zalezhei [Cyclicality of precipitation accumulation of oil-bearing basins and the pattern of deposits]*. Novosibirsk, 1978, pp. 80–97 (in Russian).
7. Obrovec S. M., Jashin I. A. Oil-promising domonic facies in the inter-salt Devonian sediments of the Central region of the Pripyat Trough. *Litasfera = Lithosphere*, 2011, no. 2(35), pp. 85–96 (in Russian).
8. Obrovec S. M., Jashin I. A. Features of the formation and distribution of Devonian deposits with the remnants of radiolarians in the Pripyat trough. *Litasfera = Lithosphere*, 2011, no. 1 (34), pp. 82–93 (in Russian).
9. Neruchev S. G., Rogozina E. A., Parparova G. M., Zelichenko A., Silina N., Lebedev B. A., Beletskaya S. N., Sobolev V. S., Shimansky V. K. *Oil and gas formation in depositions of the house type*. Leningrad, Nedra Publ., 1986. 247 p.
10. Jarvie D. M., Hill R. J., Ruble T. E., Pollastro R. M. Unconventional Shale-Gas Systems: The Mississippian Barnett Shale of North-Central Texas as One Model for Thermogenic Shale-Gas Assessment. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 2007, vol. 91, no. 4, pp. 475–499. <https://doi.org/10.1306/12190606068>
11. Wilson J. L. *Carbonate Facies in Geological History*. New York, Springer-Verlag. 443 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-6383-8>
12. Obrovec S. M. Famennian volcanism and its influence on sedimentogenesis in the Pripyat basin of the mature phase of rifting. *Litasfera = Lithosphere*, 2016, no. 2(45), pp. 48–57 (in Russian).
13. Lukin A. E. On the nature of the fracturing of petroliferous rocks-reservoirs with low-permeable matrix. *Dopovidi Natsional'noi akademii nauk Ukraini = Doklady National Academy of Sciences of Ukraine*, 2015, no. 6, pp. 114–122 (in Russian).

Информация об авторах

Обровец Светлана Митрофановна – канд. геол.-минер. наук, вед. науч. сотрудник. Научно-производственный центр по геологии (ул. Купревича, 10, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: sobrovets@mail.ru.

Яшин Игорь Александрович – канд. геол.-минер. наук, заведующий лабораторией. Белорусский научно-исследовательский проектный институт нефти (Артиллерийская ул., 8, 240022, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: yashin@beloil.by.

Information about the authors

Abravets Svetlana Mitrophanovna – Ph. D. (Geology), Leading researcher. Research and Production Centre for Geology (10, Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sobrovets@mail.ru.

Yashin Igory Aleksandrovich – Ph. D. (Geology), Head of the Laboratory. Belarusian Research Design Institute of Petroleum (8, Artilleryiskaya Str., 240022, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: yashin@beloil.by.

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

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ
TECHNICAL SCIENCES

УДК 536.46:533.6
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-3-341-346>

Поступило в редакцию 27.11.2017
Received 27.11.2017

М. С. Ассад, В. В. Грушевский, академик О. Г. Пенязьков, И. Н. Тарасенко

*Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь*

**ВЫБРОСЫ ПОЛИЦИКЛИЧЕСКИХ АРОМАТИЧЕСКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ
В ПРОДУКТАХ СГОРАНИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ БЕНЗИНОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

Аннотация. Методом газовой хроматографии исследованы концентрации 16 полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) в продуктах сгорания бензина, выбрасываемых в атмосферу двигателями внутреннего сгорания (ДВС). Определены концентрации ПАУ в пробах отработавших газов, отбираемых после каталитического нейтрализатора, при работе ДВС на пяти режимах: режим холостого хода, режим повышенных оборотов, режим нагрузки, режим холодного запуска ДВС (прогрев двигателя) и переходный режим. Установлено влияние октанового числа бензина с использованием бензинов марок АИ-92, АИ-95 и АИ-98 на содержание ПАУ в продуктах сгорания. Концентрация наиболее канцерогенного компонента – бенз(а)пирена – в отработавших газах после каталитического нейтрализатора существенно превышает ПДК воздуха рабочей зоны при работе ДВС в режиме нагрузки.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, полициклические ароматические углеводороды, продукты сгорания, октановое число

Для цитирования: Выбросы полициклических ароматических углеводородов в продуктах сгорания автомобильных бензиновых двигателей / М. С. Ассад [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 3. – С. 341–346. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-3-341-346>

Mohamad S. Assad, Vladimir V. Grushevski, Academician Oleg G. Penyazkov, Ilya N. Tarasenko

A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

**EMISSION OF POLYCYCLIC AROMATIC HYDROCARBONS CONTAINED
IN COMBUSTION PRODUCTS OF GASOLINE ENGINES**

Abstract. The concentration of 16 polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the gasoline combustion products emitted into the atmosphere by internal combustion engines (ICE) has been measured using the gas chromatography method. The concentrations of PAHs in the exhaust gases sampled behind a catalytic converter has been determined when the ICE operates in five modes: idle mode, high speed mode, load mode, ICE cold start mode (engine warm-up) and transient mode. Using 92 RON, 95 RON and 98 RON gasoline the effect of the octane number of gasoline on the PAHs content in the exhaust gases has been revealed. The concentration of the most carcinogenic component (benzo(a)pyrene) in the exhaust gases behind a catalytic converter significantly exceeds a reference value of benzo(a)pyrene in the atmospheric air established by the WHO and the EU for ICE in the load mode.

Keywords: internal combustion engine, polycyclic aromatic hydrocarbons, combustion products, octane number

For citation: Assad M. S., Grushevski V. V., Penyazkov O. G., Tarasenko I. N. Emission of polycyclic aromatic hydrocarbons contained in combustion products of gasoline engines. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2018, vol. 62, no. 3, pp. 341–346 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-3-341-346>

Введение. В последние годы значительные усилия направлены на решение одной из наиболее острых экологических проблем, связанных с загрязнением окружающей среды веществами, выбрасываемыми автомобильными двигателями внутреннего сгорания (ДВС). Наиболее опасными для здоровья человека считаются выбросы полициклических ароматических углеводоро-

дов (ПАУ). Эти соединения являются особо токсичными и относятся к первому классу опасности, поскольку многие из них обладают мутагенными, тератогенными и канцерогенными свойствами, т. е. они способны нарушать генетические программы клеток и вызывать раковые заболевания различных органов человека. Наиболее опасными из них являются бенз(β)флуорантен, бенз(γ)флуорантен, фенантрен (C₁₄H₁₀) и особенно бенз(α)пирен (C₂₀H₁₂), который будучи относительно стабильным химическим соединением, может долго мигрировать из одного объекта в другой [1].

Несмотря на чрезвычайную опасность канцерогенных веществ класса ПАУ для организма человека и окружающей среды, работ по исследованию их образования и содержания в отработавших газах автомобильных двигателей крайне мало. Опубликованные исследования в основном рассматривают канцерогенные выбросы дизельных двигателей в ограниченных условиях их работы [2–4].

В настоящее время выбросы ПАУ не нормируются в силу малости их концентрации в продуктах сгорания и затрудненности их мониторинга в режиме online при работающем двигателе. Применительно к тепловым двигателям, в частности на наземном, воздушном и водном транспорте, токсичность выхлопных газов контролируется по содержанию CO, CH_x, NO и твердых частиц, на которые установлены нормы различными международными экологическими стандартами (EURO-1...EURO-6, EPA10, Post NLT и др.). Содержание ПАУ в выхлопных газах ДВС зависит от многих факторов: типа ДВС, режима его работы и состава топлива. Настоящая работа посвящена количественному анализу канцерогенных веществ класса ПАУ в выхлопных газах автомобильного бензинового двигателя, работающего на пяти режимах: режим холостого хода ($n = 750 \text{ мин}^{-1}$), режим повышенных оборотов ($n = 4000 \text{ мин}^{-1}$), режим нагрузки ($n = 3920\text{--}4320 \text{ мин}^{-1}$), режим холодного запуска ДВС (прогрев двигателя) и переходный режим (многократное резкое повышение оборотов двигателя с $n_{\text{min}} = 750 \text{ мин}^{-1}$ до $n_{\text{max}} = 5600 \text{ мин}^{-1}$ и обратно). Эти соединения, как правило, имеют пренебрежимо малую концентрацию и требуют специальных методов для их обнаружения. В настоящей работе для этого использовались методы газовой хроматографии и масс-спектрометрии. Определены концентрации 16 соединений класса ПАУ в газовых пробах, взятых до и после пропускания продуктов сгорания через каталитический нейтрализатор, который входит в заводскую комплектацию автомобиля. В качестве топлива использовался бензин трех марок АИ-92, АИ-95 и АИ-98.

Экспериментальная установка и методика исследования. Исследования проводились на экспериментальном стенде, разработанном на базе четырехтактного четырехцилиндрового бензинового двигателя HONDA D15B2 с распределенным впрыском топлива. Стенд был дополни-

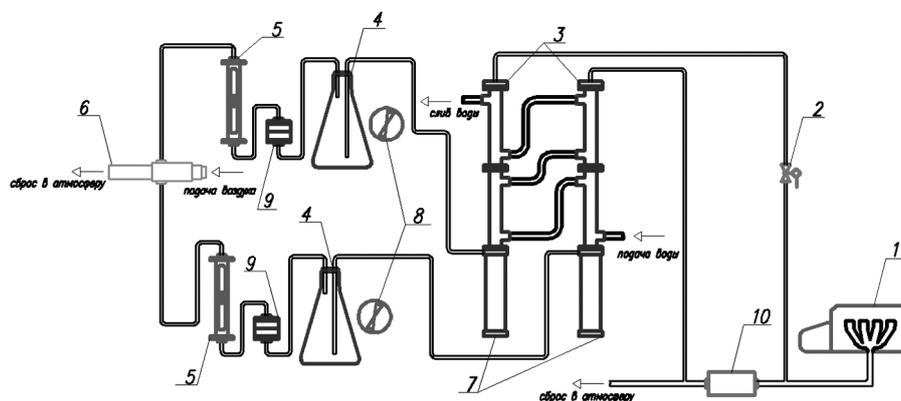


Рис. 1. Принципиальная схема системы отбора проб ПАУ из выхлопной трубы двигателя до и после каталитического нейтрализатора: 1 – двигатель внутреннего сгорания; 2 – запорный кран; 3 – влагоотделители; 4 – колбы; 5 – ротаметр; 6 – струйный насос (эжектор); 7 – резервуары для сбора и слива конденсата; 8 – вентиляторы; 9 – ловушка с сорбентом; 10 – каталитический нейтрализатор

Fig. 1. Schematic diagram of the selection system of PAHs samples from the exhaust pipe engine in front of and behind the catalytic converter: 1 – internal combustion engine; 2 – stop valve; 3 – moisture separators; 4 – flasks; 5 – rotameter; 6 – jet pump (ejector); 7 – condensate collection and discharge tanks; 8 – fans; 9 – sorbent trap; 10 – catalytic converter

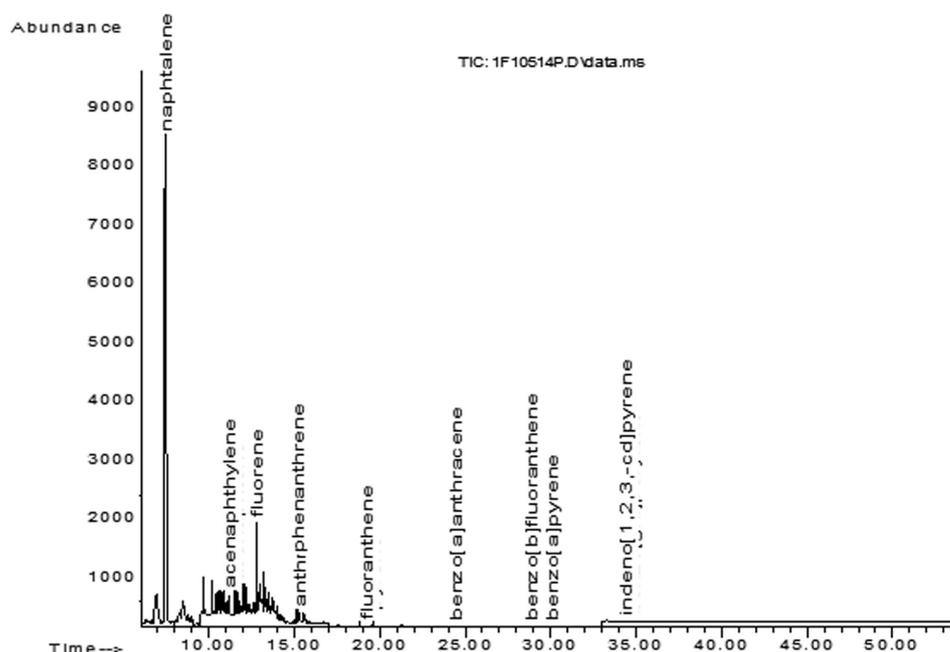


Рис. 2. Хроматограмма ПАУ при работе двигателя в режиме холостого хода с частотой вращения коленчатого вала $n = 750 \text{ мин}^{-1}$

Fig. 2. PAHs chromatogram in the engine operating in the idle mode with a crankshaft rotation frequency of $n = 750 \text{ min}^{-1}$

тельно оборудован специальной системой отбора проб отработавших газов, схематично показанной на рис. 1. Хроматографический анализ проводился в соответствии с US Compendium Method TO-13A и его национальным аналогом, представляющим государственный стандарт Республики Беларусь СТБ 17.13.05-03–2008/ISO11338-1:2003 «Охрана окружающей среды и природопользование. Мониторинг окружающей среды. Выбросы от стационарных источников. Определение полициклических ароматических углеводородов в газах и на частицах. Часть 1. Отбор проб» и «Часть 2. Подготовка проб, очистка и определение». ПАУ были отделены от выхлопных газов с помощью специальной сорбентсодержащей ловушки, входящей в состав системы отбора газов. Затем образец экстрагировали из сорбента дихлорметаном и анализировали с применением газового хроматографа Agilent Technologies 7890A и масс-спектрометрического детектора Agilent Technologies 5975C. На рис. 2 показана хроматограмма для 16 ПАУ, полученная с использованием методов газовой хроматографии и масс-спектрометрии для ДВС, работающего на бензине АИ-92 в режиме холостого хода при $n = 750 \text{ мин}^{-1}$. Отбор проб осуществлен после пропускания продуктов сгорания через каталитический нейтрализатор.

Результаты и их обсуждение. Измеренные концентрации ПАУ в образцах продуктов сгорания бензина после каталитического нейтрализатора при работе двигателя в режимах холостого хода, повышенных оборотов, нагрузки и в переходном режиме представлены на рис. 3. В этих пробах обнаружены канцерогенные вещества бенз(а)пирен и бенз(а)антрацен, содержание которых во много раз выше допустимых значений, установленных Всемирной организацией здравоохранения ($0,12 \text{ нг/м}^3$) и Европейским агентством по окружающей среде (1 нг/м^3) для атмосферного воздуха населенных пунктов [5; 6].

Анализ полученных результатов показывает, что концентрация наиболее токсичного вещества бенз(а)пирена в выхлопных газах после каталитического нейтрализатора при работе двигателя в режиме холостого хода (рис. 3, *a*) на бензине марки АИ-92 определена на уровне $0,28 \text{ мкг/м}^3$, что в сотни раз превышает допустимую концентрацию этого вещества, установленную Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ) и Европейским агентством по окружающей среде (ЕС). В случае, когда ДВС работает в режимах нагрузки (рис. 3, *b*) и повышенных оборотов (рис. 3, *c*), содержание бенз(а)пирена в выхлопных газах после каталитического нейтрализатора

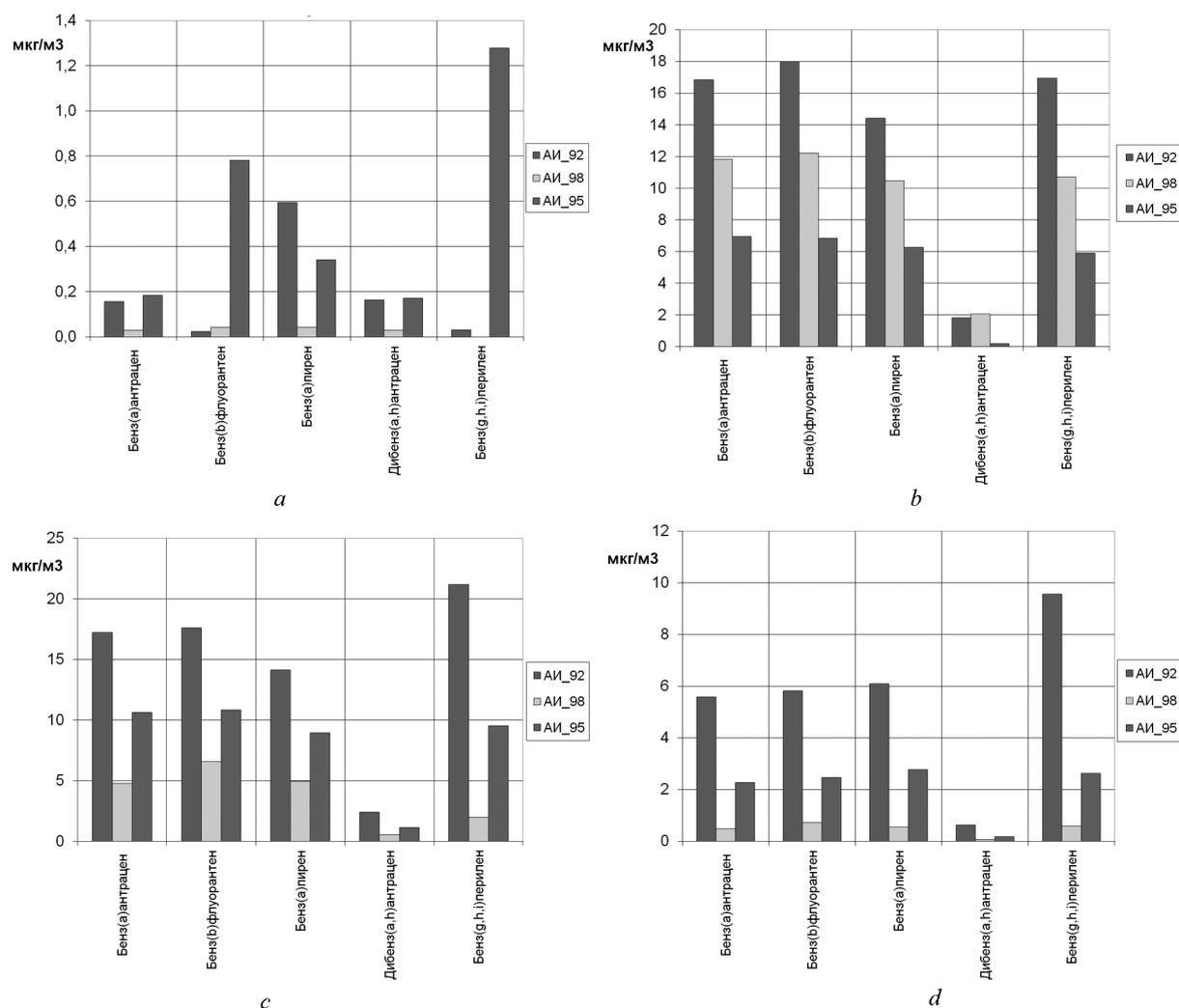


Рис. 3. Концентрации ПАУ в отработавших газах после каталитического нейтрализатора при работе ДВС в режимах: *a* – холостой ход, *b* – нагрузка, *c* – повышенные обороты, *d* – переходный режим

Fig. 3. RAHs concentration in the exhausted gases behind the catalytic converter during the ICE operation in the following modes: *a* – idle, *b* – load, *c* – increased rotations, *d* – transient

существенно превышает допустимые значения для всех трех используемых бензинов: концентрация бенз(а)пирена составила в режиме нагрузки 24,41, 24,69 и 16,26 мкг/м³, а в режиме повышенных оборотов 14,14, 4,97, 8,96 мкг/м³ соответственно для АИ-92, АИ-98 и АИ-95. Концентрация ПАУ в выхлопных газах, прошедших через каталитический нейтрализатор двигателя, работающего в этом режиме, была снижена в целом на 20–50 % по сравнению с пробами перед каталитическим нейтрализатором. Например, концентрация бенз(а)пирена в выхлопных газах после каталитического нейтрализатора составляла 14,41, 10,47 и 6,25 мкг/м³ соответственно для бензинов АИ-92, АИ-98 и АИ-95.

Работа двигателя в переходном режиме (рис. 3, *d*) характеризуется значительным выделением бенз(а)пирена, содержание которого в отработавших газах после каталитического нейтрализатора составляет 6,09, 0,54 и 2,77 мкг/м³ при сжигании бензинов АИ-92, АИ-98 и АИ-95 соответственно, что почти на 4–5 порядков превышает допустимые значение бенз(а)пирена в атмосферном воздухе, установленное ВОЗ и ЕС. Отметим, что наименьшее содержание всех ПАУ зарегистрировано при работе двигателя на бензине марки АИ-98.

При работе двигателя на бензине АИ-95 в режиме холодного запуска концентрация наиболее канцерогенного компонента бенз(а)пирена в отработавших газах после каталитического нейтра-

лизатора составляет $0,52 \text{ мкг/м}^3$, что в сотни раз превышает допустимые величины ВОЗ и ЕС. При сжигании в двигателе бензинов АИ-92 и АИ-98 концентрация этого же канцерогена равна соответственно $0,06$ и $0,11 \text{ мкг/м}^3$. Отметим также, что при работе двигателя на бензине АИ-92 такие компоненты, как бенз(β)флуорантен, дибенз(a,h)антрацен и бенз(g,h,i)перилен практически полностью нейтрализуются катализатором.

Заключение. Проведенный анализ показывает, что в продуктах сгорания присутствуют соединения типа ПАУ, обладающие сильными канцерогенными и токсикологическими свойствами, вызывающими тяжелые заболевания человека. Выбросы канцерогенных веществ, в частности наиболее опасного соединения бенз(α)пирена в атмосферу в процессе эксплуатации ДВС многократно превышает допустимые значения, установленные Всемирной организацией здравоохранения и Европейским агентством по окружающей среде для атмосферного воздуха населенных пунктов. Этот эффект наблюдается в продуктах сгорания исследованных бензинов трех марок АИ-92, АИ-95 и АИ-98. Установлено, что количество каждого соединения класса ПАУ в продуктах сгорания ДВС зависит от режима его работы и октанового числа бензина.

Полученные результаты демонстрируют остроту проблемы загрязнения атмосферного воздуха крупных городов канцерогенными веществами типа ПАУ, выбрасываемыми автомобильными и другими тепловыми двигателями. Для решения этой проблемы необходима оптимизация процесса горения углеводородных топлив в тепловых двигателях с целью достижения полного реагирования компонентов горючей смеси и получения на выходе только диоксида углерода, воды и азота. Также решением этой проблемы может стать разработка эффективных систем снижения токсичности отработавших газов автомобильных двигателей, способных нейтрализовать не только CO , CH_x , NO_x , но и более вредные вещества – канцерогенные ПАУ.

Список использованных источников

1. Ассад, М. С. Продукты сгорания жидких и газообразных топлив: образование, расчет, эксперимент / М. С. Ассад, О. Г. Пенязков. – Минск: Беларус. навука, 2010. – 305 с.
2. Analysis of C_1 , C_2 , and C_{10} through C_{33} particle-phase and semi-volatile organic compound emissions from heavy-duty diesel engines / Z. G. Liu [et al.] // *Atmospheric Environment*. – 2010. – Vol. 44, N 8. – P. 1108–1115. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.11.036>
3. Effects of Biodiesel Blending on Particulate and Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Emissions in Nano/Ultrafine/Fine/Coarse Ranges from Diesel Engine / Shu-Mei Chien [et al.] // *Aerosol and Air Quality Research*. – 2009. – Vol. 9, N 1. – P. 18–31. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2008.09.0040>
4. Shou-Heng, Liu. Emissions of Regulated Pollutants and PAHs from Waste-cooking-oil Biodiesel fuelled Heavy-duty Diesel Engine with Catalyzer / Shou-Heng Liu, Yuan-Chung Lin, Kuo-Hsiang Hsu // *Aerosol and Air Quality Research*. – 2012. – Vol. 12, N 2. – P. 218–227. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2011.09.0144>
5. WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants (2010) [Electronic resource]. – Mode of access: http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0009/128169/e94535.pdf. – Date of access: 28.08.2005.
6. Air quality in Europe – 2015 report (2015) [Electronic resource]. – Mode of access: https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2015/at_download/file. – Date of access: 30.11.2005.

References

1. Assad M. S., Penyazkov O. G. *Products of combustion of liquid and gaseous fuels. Formation, calculation, experiment*. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ., 2010. 305 p. (in Russian).
2. Liu Z. G., Berg D. R., Vasys V. N., Dettmann M. E., Zielinska B., Schauer J. J. Analysis of C_1 , C_2 , and C_{10} through C_{33} particle-phase and semi-volatile organic compound emissions from heavy-duty diesel engines. *Atmospheric Environment*, 2010, vol. 44, no. 8, pp. 1108–1115. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.11.036>
3. Shu-Mei Chien, Yuh-Jeen Huang, Shunn-Cheng Chuang, Hsi-Hsien Yang. Effects of Biodiesel Blending on Particulate and Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Emissions in Nano/Ultrafine/Fine/Coarse Ranges from Diesel Engine. *Aerosol and Air Quality Research*, 2009, vol. 9, no. 1, pp. 18–31. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2008.09.0040>
4. Shou-Heng Liu, Yuan-Chung Lin, Kuo-Hsiang Hsu. Emissions of Regulated Pollutants and PAHs from Waste-cooking-oil Biodiesel-fuelled Heavy-duty Diesel Engine with Catalyzer. *Aerosol and Air Quality Research*, 2012, vol. 12, no. 2, pp. 218–227. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2011.09.0144>
5. WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants (2010). Available at: http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0009/128169/e94535.pdf (accessed 28 August 2005).
6. Air quality in Europe – 2015 report. (2015). Available at: https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2015/at_download/file (accessed 30 November 2005).

Информация об авторах

Ассад Мохамад Сабетович – д-р техн. наук, вед. науч. сотрудник. Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: assad@hmti.ac.by.

Грушевский Владимир Владиславович – канд. хим. наук, вед. науч. сотрудник. Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: grushevskiy_v@mail.ru.

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

Тарасенко Илья Николаевич – мл. науч. сотрудник. Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: yayo@tut.by.

Information about the authors

Mohamad Assad – D. Sc. (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). E-mail: assad@hmti.ac.by.

Grushevski Vladimir Vladislavovich – Ph. D. (Chemistry), 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). E-mail: grushevskiy_v@mail.ru.

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

Tarasenko Ilya Nikolaevich – Junior researcher. A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: yayo@tut.by.

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

УДК 621.3.049.77:621.373.826
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-3-347-352>

Поступило в редакцию 22.11.2017
Received 22.11.2017

Член-корреспондент В. А. Пилипенко, В. А. Солодуха, В. А. Горушко, А. А. Омельченко

Открытое акционерное общество «Интеграл», Минск, Республика Беларусь

ТВЕРДОФАЗНАЯ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИЯ МЕХАНИЧЕСКИ НАРУШЕННОГО СЛОЯ КРЕМНИЯ ПРИ БЫСТРОЙ ТЕРМООБРАБОТКЕ

Аннотация. Состояние поверхности кремниевых пластин является одним из фундаментальных факторов, определяющих качество и надежность интегральных схем. В связи с этим большое внимание уделяется вопросам ее подготовки перед процессом их формирования. Одним из возможных путей улучшения поверхностных свойств кремния может явиться его твердофазная рекристаллизация с использованием быстрой термической обработки импульсами секундной длительности. Цель работы заключалась в исследовании влияния быстрой термической обработки на структуру нарушенного слоя поверхности кремниевых пластин после химико-механической полировки. В качестве образцов использовались пластины кремния диаметром 100 мм марки КДБ 12 и КЭФ 4,5 ориентации <100> после химико-механической полировки, прошедшие быструю термическую обработку в течение 7 с, что обеспечивало их нагрев до 1100 °С и без обработки. Методами оже-спектроскопии, спектральной эллипсометрии, рентгеновской дифракции показано, что такая обработка приводит к увеличению структурного совершенства поверхностного слоя кремниевых пластин, за счет уменьшения глубины механически нарушенного слоя, обеспечивая получение атомарно-плоской поверхности.

Ключевые слова: быстрая термическая обработка, нарушенный слой, кремниевая пластина, твердофазная рекристаллизация, коэффициент преломления, коэффициент поглощения

Для цитирования: Твердофазная рекристаллизация механически нарушенного слоя кремния при быстрой термообработке / В. А. Пилипенко [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 3. – С. 347–352. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-3-347-352>

**Corresponding Member Vladimir A. Pilipenko, Vitali A. Solodukha,
Valiantsina A. Gorushko, Anna A. Omelchenko**

Holding Managing Company "Integral", Minsk, Republic of Belarus

SOLID PHASE RECRYSTALLIZATION OF A MECHANICALLY DISRUPTED SILICON LAYER SUBJECTED TO RAPID THERMAL TREATMENT

Abstract. Quality and reliability of integrated circuits to a great extent depend on the surface condition of silicon wafers. In view of this, great attention is paid on the aspects of their preparation prior to their formation. It is of significant interest to study the possibility of applying rapid thermal treatment for solid phase re-crystallization of a mechanically disrupted layer of the wafer working side. The objective of this work was to establish the behavior regularities of a mechanically disrupted layer subjected to rapid thermal treatment with 2 s light pulses. As samples, there were used the silicon wafers with a diameter of 100 mm, grade KDB 12 and KEF 4.5, orientation <100> after chemical-mechanical polishing subjected to rapid thermal treatment during 7 s, which ensured their heating up to 1100 °C and without treatment. The application of the methods of Auger-spectroscopy, spectral ellipsometry, X-ray diffraction made it possible to state that such treatment increases the structural flawlessness of the surface layer of silicon wafers due to a decrease in the mechanically disrupted layer, thus ensuring obtaining the atomic-flat surface.

Keywords: rapid thermal treatment, disrupted layer, silicon wafer, solid phase re-crystallization, diffraction ratio, absorption ratio

For citation: Pilipenko V. A., Solodukha V. A., Gorushko V. A., Omelchenko A. A. Solid phase recrystallization of a mechanically disrupted silicon layer subjected to rapid thermal treatment. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2018, vol. 62, no. 3, pp. 347–352 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-3-347-352>

Введение. Одним из определяющих факторов создания надежных изделий микроэлектроники с воспроизводимыми электрофизическими параметрами является степень совершенства кристаллической решетки, микрорельеф и чистота поверхности кремниевых пластин перед их формированием. Поэтому обязательным условием получения бездефектных полупроводниковых изделий является отсутствие на поверхности пластин механически нарушенного слоя и каких-

либо загрязнений [1; 2]. Известно, что после механической шлифовки и полировки на поверхности кремниевой пластины остается нарушенный слой и различного рода загрязнения, которые существенным образом влияют как на дальнейшие технологические процессы (травление, окисление), так и в конечном счете на параметры полупроводниковых приборов, особенно с мелкими (менее 1 мкм) слоями. Поэтому контроль нарушенного слоя и способы его удаления, а также очистка поверхности представляют важную задачу в планарной технологии [3].

Одним из методов удаления механически нарушенного слоя является лазерная обработка поверхности кремниевых пластин импульсами наносекундной длительности, в результате которой при температуре плавления кремния в области нарушений кристаллической решетки идет полное ее восстановление [4]. Наиболее простым и эффективным методом удаления нарушенного слоя является полирующее травление поверхности кремния [5].

Для очистки поверхности от различного рода загрязнений применяют способы, которые состоят из ряда последовательных операций, каждая из которых предназначена для удаления одного или

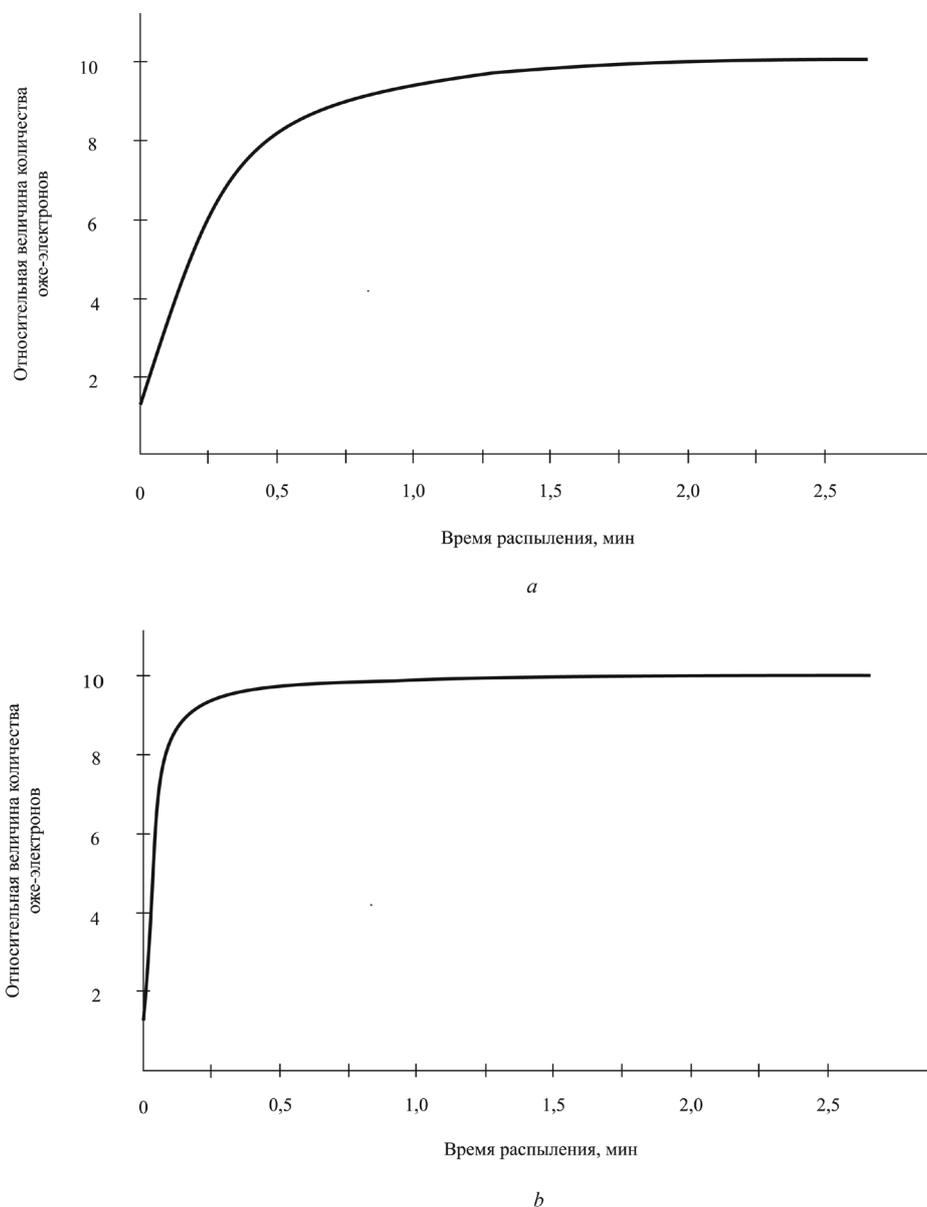


Рис. 1. Зависимость количества оже-электронов от времени распыления кремниевой пластины до (а) и после (б) быстрой термообработки

Fig. 1. Dependence of the quantity of Auger-electrons on the sputtering time of the silicon wafer prior to (a) and after (b) the rapid thermal treatment

нескольких видов загрязнений. Каждый из методов улучшения характеристик поверхности кремниевых пластин имеет определенные преимущества и недостатки. Одним из возможных путей улучшения поверхностных свойств кремния может явиться его твердофазная рекристаллизация с использованием быстрой термической обработки (БТО) импульсами секундной длительности, обеспечивающими нагрев пластины до 1000 °С. Использование данной обработки обусловлено простотой, относительной легкостью изменения параметров облучения, высокой скоростью протекания процессов перестройки дефектной структуры, увеличением скорости твердофазных реакций.

Материалы и методы исследования. Влияние быстрой термообработки на структуру нарушенного слоя исследовалось с использованием методов оже-спектроскопии, электронной микроскопии, кривых дифракционного отражения, спектральной эллипсометрии. С помощью оже-спектроскопии с прецизионным распылением поверхностных слоев кремния и регистрацией интенсивности выхода оже-электронов с поверхности кремния снималась зависимость количества выходящих электронов от времени распыления и определялась глубина нарушенного слоя. Методом электронной микроскопии и кривых дифракционного отражения (КДО) проводились исследования структуры поверхности исходных кремниевых пластин до и после быстрой термической обработки. Оптические характеристики поверхности кремниевых пластин исследовались методом спектральной эллипсометрии. В качестве образцов применялись пластины кремния диаметром 100 мм марки КДБ 12 и КЭФ 4,5 ориентации $\langle 100 \rangle$ после химико-механической полировки, прошедшие быструю термическую обработку в течение 7 с, что обеспечивало их нагрев до 1100 °С, и без обработки.

Результаты и их обсуждение. Анализ зависимости выхода оже-электронов от времени распыления кремниевой пластины показал, что на пластинах без БТО выход на монокристаллический кремний происходит через 1,75 мин, что соответствует глубине нарушенного слоя 3,8 нм (рис. 1, *a*). После проведения быстрой термической обработки его глубина значительно уменьшилась и составила менее 1,0 нм (рис. 1, *b*). Данный результат указывает на то, что в ходе быстрой термообработки при температурах выше 600 °С идет процесс его твердотельной рекристаллизации, приводящий к уменьшению напряжений в нарушенном слое кремния, его структурному совершенству и как следствие к уменьшению глубины.

Электронно-микроскопические исследования поверхности данных пластин позволили установить, что они как до, так и после обработки характеризуются гладким микрорельефом, практически без микронеровностей. Однако картина дифракции «на отражение» до БТО свидетельствует о преимущественной параллельности кристаллографических плоскостей более глубинных слоев (рис. 2, *a*), а после БТО (рис. 2, *b*) на ней появляются непрерывные вертикальные стержни, являющиеся результатом двумерной дифракции электронов от поверхностных атомных слоев и характеризующие атомарно-плоскую поверхность.

Данные результаты полностью подтверждаются исследованиями, проведенными методом КДО. Сравнение КДО от поверхности кремния до (рис. 3, *a*) и после (рис. 3, *b*) быстрой термообработки показали, что уширение основания КДО, характерное для нарушенного слоя, исчезает после обработки и кривая приближается к эталонной для идеальной поверхности (рис. 3).

Важнейшими параметрами исходных кремниевых пластин, несущими информацию о состоянии поверхно-

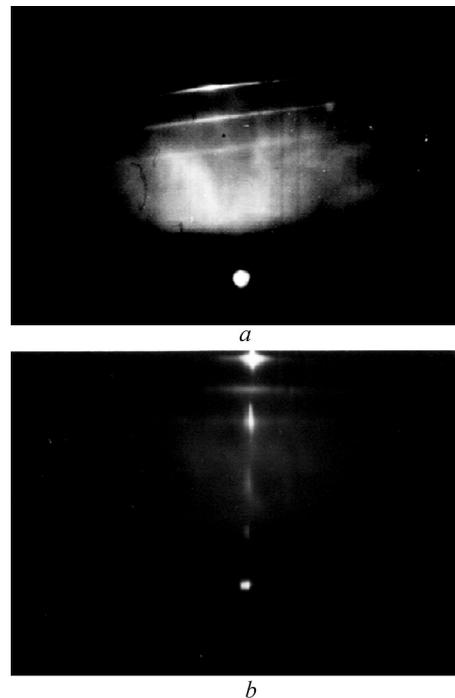


Рис. 2. Картина вторичной дифракции электронов от поверхности кремниевой пластины до (*a*) и после (*b*) быстрой термической обработки

Fig. 2. Picture of the electrons secondary diffraction from the silicon wafer's surface to (*a*) and after (*b*) the rapid thermal treatment

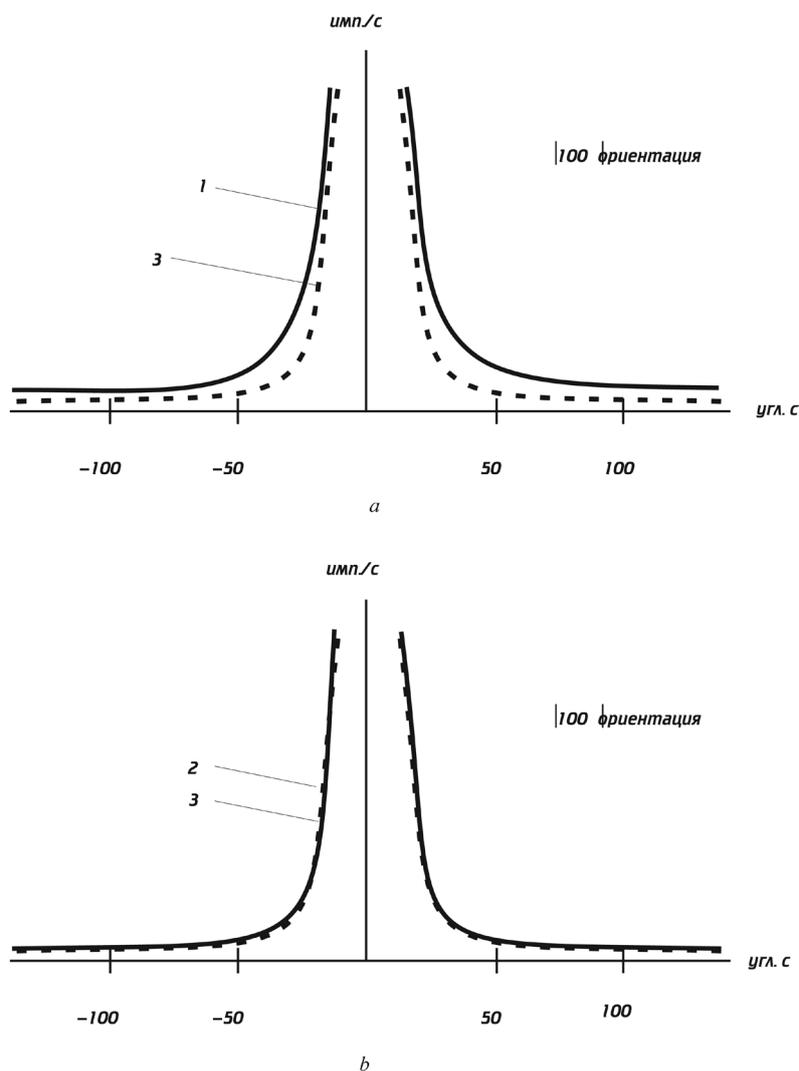
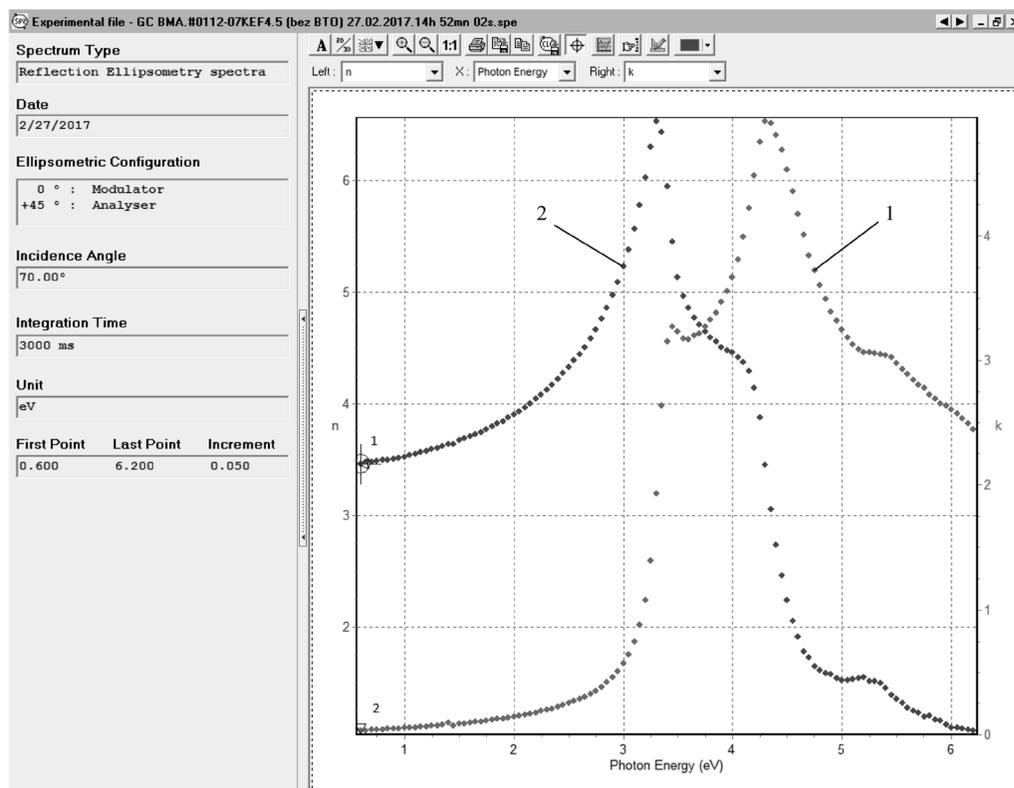


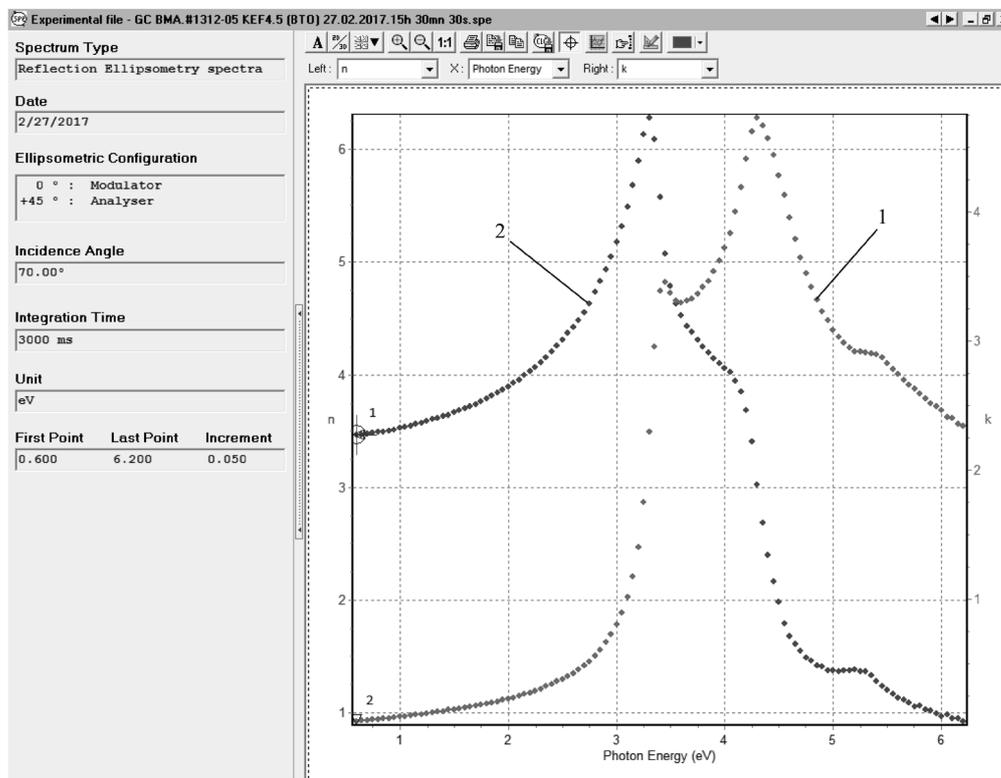
Рис. 3. Кривые дифракционного отражения от поверхности кремниевой пластины после механической полировки (а) и последующей быстрой термообработки (b): 1 – до обработки; 2 – после обработки; 3 – эталонной поверхности
 Fig. 3. The diffraction reflection curves from the silicon wafer's surface after the mechanical polishing (a) and the subsequent rapid thermal treatment (b): 1 – prior to treatment; 2 – after treatment; 3 – of the standard surface

сти, являются ее оптические характеристики, а именно, коэффициент преломления и поглощения. С точки зрения нарушенного слоя наиболее чувствительным к его наличию является коэффициент поглощения, который может определяться с высокой точностью методом спектральной эллипсометрии. Данный метод также позволяет определять влияние различных факторов на дисперсию оптических параметров в широком спектральном диапазоне. Анализ спектральной зависимости коэффициента преломления и коэффициента поглощения кремния показал, что она имеет явно выраженное изменение коэффициента поглощения в области 3,43 эВ (рис. 4). Такой рост коэффициента поглощения кремния в данной области спектра может быть связан с тем, что наблюдаемое поглощение соответствует прямым переходам сингулярности Ван Хова зоны проводимости. В кремнии Г-точка зоны проводимости считается точкой сингулярности Ван Хова, энергия которой составляет 3,43 эВ.

Исследование образцов после быстрой термической обработки данным методом показало, что в области поглощения, соответствующей Г-точке зоны проводимости, имеет место рост коэффициента поглощения (рис. 4) по сравнению с его величиной до обработки. Такое его поведение, по-видимому, связано со следующими причинами. Поскольку кремний имеет гранцентрированную кубическую решетку, то ее обратная решетка является объемноцентрированной с первой зоной



a



b

Рис. 4. Спектральная зависимость коэффициентов экстинкции (1) и преломления (2) кремния до (a) и после (b) быстрой термообработки

Fig. 4. Spectral dependence of the extinction ratio (1) and the refraction ratio (2) of the initial silicon to (a) and after (b) the rapid thermal treatment

Бриллюэна в форме усеченного октаэдра. В такой структуре Г-точка обладает полной симметрией куба, а следовательно, любые искажения кристаллической решетки за счет ее деформации под действием напряжений будут приводить к ее нарушению. Это означает, что наличие деформации кристаллической решетки кремния с рабочей стороны пластины будет приводить к соответствующему изменению поглощения кремния в спектральном диапазоне, близком к 3,43 эВ. В нашем случае увеличение поглощения в данной области говорит о том, что быстрая термообработка приводит к улучшению структуры поверхностного слоя с рабочей стороны пластины за счет уменьшения действующих в нем напряжений, а следовательно, и деформации кристаллической решетки. При этом данный результат не зависит от типа проводимости исследуемых пластин кремния.

Исследования величины коэффициента поглощения на длине волны 632,8 нм показали, что в результате быстрого термического отжига пластин КДБ 12 импульсами секундной длительности коэффициент поглощения уменьшился в 1,55 раза – с 0,014 до 0,009, для пластин кремния КЭФ 4,5 – с 0,012 до 0,011. Это свидетельствует о том, что в процессе такой обработки произошла также очистка поверхности кремния от различного рода загрязнений и перестройка ее микроструктуры.

Заключение. Таким образом, впервые установлено, что быстрая термообработка исходных кремниевых пластин приводит к увеличению структурного совершенства их рабочей поверхности за счет уменьшения глубины механически нарушенного слоя, обеспечивая получение атомарно-плоской поверхности. Методом спектральной эллипсометрии впервые проведено наблюдение сингулярности Ван Хофа в Г-точке зоны проводимости при 3,43 эВ, и показано влияние деформации кристаллической решетки под действием напряжений, действующих в нарушенном слое, на коэффициент поглощения кремния в данной области спектра.

Список использованных источников

1. Tong, Q.-Y. Wafer bonding and layer splitting for Microsystems / Q.-Y. Tong, M. Gosele // *Adv. Mater.* – 1999. – Vol. 11, N 17. – P. 1409–1425. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1521-4095\(199912\)11:17%3C1409::aid-adma1409%3E3.0.co;2-w](https://doi.org/10.1002/(sici)1521-4095(199912)11:17%3C1409::aid-adma1409%3E3.0.co;2-w)
2. Красников, Г. Я. Физико-технологические основы обеспечения качества СБИС / Г. Я. Красников, Н. А. Зайцев – М.: Микрон-принт, 1999. – Ч. 2. – 216 с.
3. Концевой, Ю. А. Пластичность и прочность полупроводниковых материалов и структур / Ю. А. Концевой, Ю. М. Литвинов, Э. А. Фаттахов – М.: Радио и связь, 1982. – 240 с.
4. Свойства поверхности кремния после лазерной обработки импульсами наносекундной длительности / В. А. Пилипенко [и др.] // ИФЖ. – 2008. – Т. 81, № 9. – С. 592.
5. Степаненко, И. П. Основы микроэлектроники / И. П. Степаненко – М.: Сов. радио, 1980. – 424 с.

References

1. Tong Q.-Y., Gosele M. Wafer bonding and layer splitting for Microsystems. *Advanced Materials*, 1999, vol. 11, no. 17, pp. 1409–1425. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1521-4095\(199912\)11:17%3C1409::aid-adma1409%3E3.0.co;2-w](https://doi.org/10.1002/(sici)1521-4095(199912)11:17%3C1409::aid-adma1409%3E3.0.co;2-w)
2. Krasnikov G. Ya., Zaitsev N. A. *Physical-Technological Fundamentals of Ensuring Quality of VLSI. Part. 2.* Moscow, Micron-print Publ., 1999. 216 p. (in Russian).
3. Kontsevoy Yu. A., Litvinov Yu. M., Fattakhov E. A. *Plasticity and Strength of the Semiconductor Materials and Structures.* Moscow, Radio and Communications Publ., 1982. 240 p. (in Russian).
4. Pilipenko V. A., Vecher D. V., Gorushko V. A., Syakerskii V. S., Petlitskaya T. V. Properties of a silicon surface exposed to nanosecond laser-radiation pulses. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2008, vol. 81, no. 3, pp. 622–626. <https://doi.org/10.1007/s10891-008-0078-4>
5. Stepanenko I. P. *Fundamentals of Microelectronics.* Moscow, Soviet Radio Publ., 1980. 424 p. (in Russian).

Информация об авторах

Пилипенко Владимир Александрович – член-корреспондент, д-р техн. наук, профессор, заместитель директора. ОАО «Интеграл» (ул. Казинца, д. 121а, 220108, Минск, Республика Беларусь). E-mail: office@bms.by.

Солодуха Виталий Александрович – канд. техн. наук, генеральный директор. ОАО «Интеграл» (ул. Казинца, д. 121а, 220108, Минск, Республика Беларусь). E-mail: VSaladukha@integral.by.

Горушко Валентина Алексеевна – ведущий инженер. ОАО «Интеграл» (ул. Казинца, д. 121а, 220108, Минск, Республика Беларусь). E-mail: office@bms.by.

Омельченко Анна Александровна – инженер. ОАО «Интеграл» (ул. Казинца, д. 121а, 220108, Минск, Республика Беларусь). E-mail: office@bms.by.

Information about the authors

Pilipenko Vladimir Aleksandrovich – Corresponding Member, D. Sc. (Engineering), Professor, Deputy Director. JSC “Integral” (121a, Kazinets Str., 220108, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: office@bms.by.

Solodukha Vitali Aleksandrovich – Ph. D. (Engineering), General Manager. JSC “Integral” (121a, Kazinets Str., 220108, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: VSaladukha@integral.by.

Gorushko Valiantsina Alekseevna – Leading engineer. JSC “Integral” (121a, Kazinets Str., 220108, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: office@bms.by.

Omelchenko Anna Aleksandrovna – Engineer. JSC “Integral” (121a, Kazinets Str., 220108, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: office@bms.by.

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

УДК 536.244, 536.27
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-3-353-363>

Поступило в редакцию 23.04.2018
Received 23.04.2018

М. Ю. Лях, А. В. Акулич, член-корреспондент П. С. Гринчук

*Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь*

СОПРЯЖЕННЫЙ ТЕПЛООБМЕН ПРИ ПОЛУЧЕНИИ СТЕКЛЯННЫХ МИКРОСФЕР В ГАЗОПЛАМЕННОМ РЕАКТОРЕ

Аннотация. В работе была предложена модель, описывающая процесс получения стеклянных микросфер в газопламенном реакторе рекуперативного типа. На основе описанной математической модели нагрева и движения частиц в высокотемпературном газовом потоке, учитывающей сопряженный теплообмен между рабочей средой реактора и рекуператором, проведено моделирование и оптимизация соответствующих процессов по геометрическим и режимным параметрам. В качестве оптимизируемой характеристики использовалось время пребывания частиц стекла в реакторе при температуре выше 1400 °С, которое определено на основе данных дифференциальной сканирующей колориметрии.

В результате оптимизационных расчетов найдена область параметров реактора (диаметр и высота, расход природного газа, расход продуваемого через рекуператор воздуха), а также режимных параметров (диаметр и расход частиц стекла), в которых возможно формирование микросфер. Полученная информация может служить основой для проектирования эффективного газопламенного реактора для получения стеклянных микросфер.

Ключевые слова: полые стеклянные микросферы, высокотемпературный газовый реактор, рекуператор

Для цитирования: Лях, М. Ю. Сопряженный теплообмен при получении стеклянных микросфер в газопламенном реакторе / М. Ю. Лях, А. В. Акулич, П. С. Гринчук // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 3. – С. 353–363. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-3-353-363>

Maria Yu. Liakh, Andrei V. Akulich, Corresponding Member Pavel S. Grinchuk

A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

CONJUGATE HEAT TRANSFER IN THE PRODUCTION OF GLASS MICROSPHERES IN A GAS-FLAME REACTOR

Abstract. A model for the process of glass microsphere production in a recuperative gas-flame reactor was proposed. Based on the described mathematical model of heating and motion of particles in a high-temperature gas stream, which takes into account conjugate heat exchange between the reactor's operating environment and the recuperator, the appropriate processes were modeled and optimized by geometric and regime parameters. The particle location time in the reactor at a temperature above 1400 °C, which was determined by data of differential scanning colorimetry, was used as an optimized characteristic.

As a result of optimization calculations, the reactor parameters (diameter and height, natural gas flow rate, air flow rate in the recuperator) were found, as well as regime parameters (diameter and flow rate of glass particles), under which microspheres can be formed. The information obtained can be a basis for designing an effective gas-flame reactor for production of glass microspheres.

Keywords: hollow glass microspheres, high temperature gas reactor, recuperator

For citation: Liakh M. Yu., Akulich A. V., Grinchuk P. S. Conjugate heat transfer in the production of glass microspheres in a gas-flame reactor. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2018, vol. 62, no. 3, pp. 353–363 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-3-353-363>

Введение. Со стремительным развитием промышленности, строительства и медицины возникает необходимость в создании новых материалов, которые были бы устойчивы к интенсивным механическим и химическим воздействиям в широком температурном диапазоне и при этом обладали бы низким коэффициентом теплопроводности и малым весом. К таким материалам можно отнести композиционные материалы, использующие в качестве наполнителя полые стеклянные микросферы [1], которые представляют собой мелкодисперсные легкосыпучие по-

рошки, состоящие из тонкостенных (0,5–2 мкм) замкнутых газонаполненных стеклянных оболочек сферической формы диаметром 20–250 мкм. Правильная сферическая форма и состав стекла способствуют высокой механической прочности и химической стойкости данного материала, а также обеспечивают низкий коэффициент теплопроводности, малое водопоглощение и радиопрозрачность. Помимо указанных свойств, полые стеклянные микросферы обладают низкой насыпной плотностью и устойчивы к высоким температурам.

Полые стеклянные микросферы и материалы на их основе благодаря уникальным характеристикам имеют широкое применение в нефтегазодобывающей и химической промышленности (буровые растворы, тампонажные материалы, катализаторы), судо- и авиастроении (облегченные материалы), строительстве (лакокрасочные материалы, многослойные конструкционные, звукозащитные и другие строительные материалы), автомобилестроении (кузовные детали, панели внутренней отделки) и др. [2–8].

Среди известных способов получения полых стеклянных микросфер наибольшее распространение получили два: золь-гель и плавление фритты в высокотемпературном газовом потоке¹.

Построение эффективного лабораторного и промышленного реактора для получения полых стеклянных микросфер возможно только на основе прогнозирования его параметров методами математического моделирования. Одна из ключевых проблем, решение которой необходимо найти – это конструкция реактора. Использование плазмы для технологии массового производства экономически неоправданно. Поэтому рассматриваются варианты создания реакторов с газопламенным обогревом. Достижение высокой температуры требует дополнительной тепловой изоляции стенок реактора. Но в этом случае при работе со стеклянным материалом через определенное время на стенках реактора начинает расти гарнисажный слой, который останавливает работу реактора. Использование неизолированного реактора требует или сверхвысоких затрат энергии или вообще не позволяет достичь требуемого уровня температур. В данной работе впервые рассматривается новый тип реактора для получения стеклянных микросфер – реактор рекуперативного типа. По щелевым каналам, организованным в стенках печи, продувается воздух. Этот воздух разогревается и подается на технологическую горелку реактора. Тем самым поднимается общая температура пламени, работа реактора становится более экономичной и энергоэффективной. Одновременно с этим, управление расходом воздуха позволяет управлять и температурой стенок реактора, что важно для устранения роста гарнисажного слоя. В данной работе представлена комплексная модель нагрева частиц исходного сырья в высокотемпературном газовом потоке, учитывающая сопряженный теплообмен между реактором и рекуператором.

Постановка задачи. Математическая модель. Схема реактора с расчетной областью представлена на рис. 1. Образование полых стеклянных микросфер происходит в вертикальном цилиндрическом реакторе (зона 1) высотой H и радиусом R_0 . Подача дымовых газов, образованных в результате сжигания смеси воздуха и природного газа в необходимой стехиометрической пропорции, осуществляется снизу реактора с заданным расходом G_g , соответствующим мощности горелки. Частицы стекла подаются в реактор с одинаковой начальной скоростью $U_{p,0}$ и температурой $T_{p,0}$ с помощью транспортного газа (аргона). Рекуператор представляет собой систему двух кольцевых каналов (зона 2 и 3), соединенных снизу, подача воздуха в который осуществляется с расходом G_a и температурой $T_{a,0}$, соответствующей температуре окружающей среды T_{env} . Толщины внутреннего и внешнего каналов рекуператора соответственно равны d_{int} и d_{ext} . Высота внутреннего канала совпадает с высотой реактора, а высота внешнего (H_0) несколько меньше из-за конструктивных особенностей подачи воздуха в реактор. Следует отметить, что в рамках данного исследования рассмотрены только случаи работы реактора с первичной подачей воздуха по внутреннему каналу рекуператора, поскольку ранее нами была показана нецелесообразность варианта работы рекуператора с первичной подачей воздуха по внешнему каналу.

При формулировке математической модели использовались следующие допущения:

скорость U_g и температура T_g газового потока одинаковы по горизонтальному сечению и зависят только от вертикальной координаты z ;

¹ Способ получения полых стеклянных микросфер: пат. 2059574 Российская Федерация: МПК C03B19/10 / В. В. Бурдов, А. В. Косяков, В. Г. Калыгин, Ф. М. Филиппков, А. Д. Ишков; дата публ.: 10.05.1996.

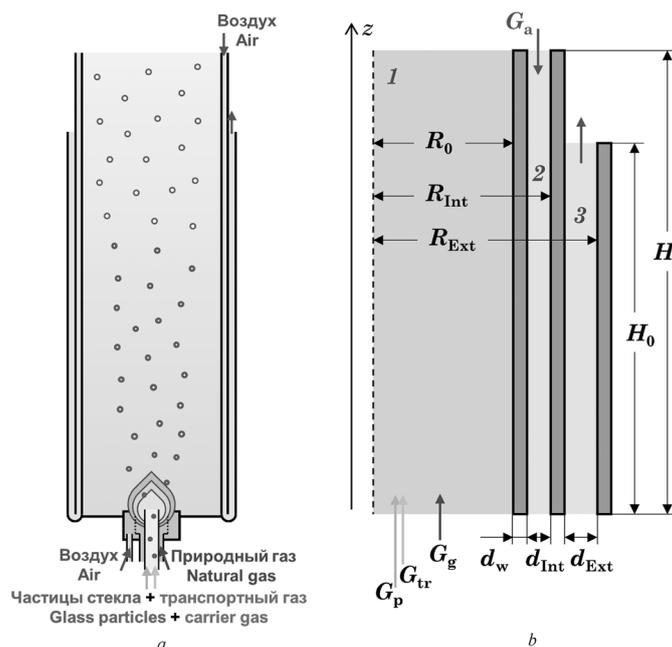


Рис. 1. Схема работы газопламенного реактора рекуперативного типа для получения полых стеклянных микросфер (а) и схема расчетной области рассматриваемой системы (b): 1 – рабочее пространство реактора, 2 – внутренний и 3 – внешний каналы рекуператора

Fig. 1. Scheme of operation of gas-flame reactor of recuperative type for producing hollow glass microspheres (a) and scheme of the calculated region of considered system (b): 1 – working space of the reactor, 2 – internal and 3 – external recuperator channel

подача частиц и транспортного газа происходит с равными расходами ($G_p = G_{tr}$);
 при движении частицы распределяются равномерно по сечению реактора;
 не рассматривается изменение размеров сферических частиц, а процесс формирования и образования полых микросфер оценивается временем пребывания частиц в требуемом температурном режиме;
 нагреваемая частица рассматривается не изотермической (рассчитывается температурное поле внутри нее), причем внешний тепловой поток, падающий на нее, полагается сферически симметричным;
 тепловое взаимодействие между частицами осуществляется через газовую среду.
 С учетом поставленной задачи и сделанных допущений математическая модель нагрева и движения частиц стекла в газовом потоке описывается следующими уравнениями.
 Уравнение для температуры газовой смеси

$$\tilde{c}_{pg} (G_g + G_{tr}) \frac{dT_g}{dz} = -2\pi R_0 \sigma_0 \varepsilon_{g,w} (T_g^4 - T_{w1}^4) - 2\pi R_0 \alpha_g (T_g - T_{w1}) - (N_p \pi d_p^2) \pi R_0^2 \alpha_p (T_g - T_p), \quad (1)$$

где \tilde{c}_{pg} – удельная теплоемкость газовой смеси при постоянном давлении; σ_0 – постоянная Стефана–Больцмана; $\varepsilon_{g,w}$ – приведенная степень черноты в системе газ/стенка реактора; T_{w1} – температура на внутренней поверхности стенки реактора; N_p – концентрация частиц стекла; d_p – диаметр частиц стекла; α_p – коэффициент конвективного теплообмена частиц стекла с газовым потоком и T_p – температура частиц стекла.

Начальная температура газа в сечении подачи частиц в реактор определяется из условия мгновенного перемешивания дымовых газов и транспортного газа на основе теплового баланса

$$T_g \Big|_{z=0} = \frac{C_{ptr} T_{tr,0} G_{tr} + C_{pg} T_{g,0} G_g}{\tilde{c}_{pg} (G_g + G_{tr})}, \quad (2)$$

где C_{pg} и C_{ptr} – удельная теплоемкость дымовых газов и транспортного газа; $T_{g,0}$ и $T_{tr,0}$ – начальная температура дымовых газов и транспортного газа.

Уравнения для температуры внутренней и наружной поверхностей (цилиндрической) стенки реактора

$$R_0 \sigma_0 \varepsilon_{g,w} (T_g^4 - T_{w1}^4) + R_0 \alpha_g (T_g - T_{w1}) + R_0 \sigma_0 \varepsilon_{p,w} (T_p^4 - T_{w1}^4) = \frac{\lambda_w}{\ln \left(1 + \frac{d_w}{R_0} \right)} (T_{w1} - T_{w2}), \quad (3)$$

$$\frac{\lambda_w}{\ln \left(1 + \frac{d_w}{R_0} \right)} (T_{w1} - T_{w2}) = (R_0 + d_w) \alpha_{a,int} (T_{w2} - T_{a,int}), \quad (4)$$

где α_g – коэффициент конвективного теплообмена стенок внутри реактора с газами; $\varepsilon_{p,w}$ – приведенная степень черноты в системе облако частиц/стенка реактора; λ_w – коэффициент теплопроводности стенки реактора; d_w – толщина стенки реактора; T_{w2} – температура на внешней поверхности стенки реактора; $\alpha_{a,int}$ – коэффициент конвективного теплообмена воздуха со стенками внутреннего канала рекуператора; $T_{a,int}$ – температура воздуха во внутреннем канале рекуператора.

Уравнение для температуры воздуха в обоих каналах рекуператора

$$\begin{aligned} -G_a C_{pa} \frac{dT_{a,int}}{dz} &= 2\pi(R_0 + d_w) \alpha_{a,int} (T_{w2} - T_{a,int}) - 2\pi(R\alpha)_{int,ext} (T_{a,int} - T_{a,ext}), \quad 0 \leq z \leq H_0, \\ -G_a C_{pa} \frac{dT_{a,int}}{dz} &= 2\pi(R_0 + d_w) \alpha_{a,int} (T_{w2} - T_{a,int}), \quad H_0 \leq z \leq H, \\ G_a C_{pa} \frac{dT_{a,ext}}{dz} &= 2\pi(R\alpha)_{int,ext} (T_{a,int} - T_{a,ext}) - 2\pi(R\alpha)_{ext,env} (T_{a,ext} - T_{env}), \end{aligned} \quad (5)$$

где C_{pa} – удельная теплоемкость воздуха; $T_{a,ext}$ – температура воздуха во внешнем канале рекуператора. Параметры $(R\alpha)_{int,ext}$ и $(R\alpha)_{ext,env}$, характеризующие теплоотдачу стенок внешнего канала рекуператора, описываются выражениям

$$\begin{aligned} (R\alpha)_{int,ext} &= \left(\frac{1}{\alpha_{a,int} R_{int}} + \frac{1}{\lambda_w} \ln \left(1 + \frac{d_w}{R_{int}} \right) + \frac{1}{\alpha_{a,ext} (R_{int} + d_w)} \right)^{-1}, \\ (R\alpha)_{ext,env} &= \left(\frac{1}{\alpha_{a,ext} R_{ext}} + \frac{1}{\lambda_w} \ln \left(1 + \frac{d_w}{R_{ext}} \right) + \frac{1}{\alpha_{env} (R_{ext} + d_w)} \right)^{-1}, \end{aligned}$$

где $\alpha_{a,ext}$ и α_{env} – коэффициент конвективного теплообмена воздуха со стенками внешнего канала рекуператора и стенки установки с окружающей средой.

Граничные условия для температуры воздуха следующие:

$$\begin{aligned} T_{a,int} \Big|_{z=H} &= T_{a,0}, \\ T_{a,ext} \Big|_{z=0} &= T_{a,int} \Big|_{z=0}. \end{aligned} \quad (6)$$

Нагрев частицы описывается одномерным нестационарным уравнением теплопроводности в сферических координатах с соответствующими граничными и начальными условиями

$$\rho_p c_p \frac{\partial T_p}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_p r^2 \frac{\partial T_p}{\partial r} \right), \quad (7)$$

$$-\lambda_p \frac{\partial T_p}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0 \quad \text{и} \quad -\lambda_p \frac{\partial T_p}{\partial r} \Big|_{r=d_p/2} = (\alpha_p (T_g - T_p) + \sigma_0 \varepsilon_{w,1p} (T_{w1}^4 - T_p^4)), \quad (8)$$

$$T_p|_{t=0} = T_{p,0}, \quad (9)$$

где ρ_p , c_p и λ_p – плотность, удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности частиц стекла; t – время; r – расстояние от центра сферической частицы (координата); $\varepsilon_{w,lp}$ – приведенная степень черноты в системе частица/стенка реактора.

Скорость частиц в реакторе определяется из уравнения движения следующего вида:

$$\frac{dU_p}{dz} = -\frac{g}{U_p} - \frac{3}{4} \frac{C_d(Re_p)}{d_p} \frac{\rho_g}{\rho_p} \frac{(U_p - U_g)}{U_p} |U_p - U_g|, \quad (10)$$

где U_p – средняя скорость частиц; g – ускорение свободного падения; ρ_g – плотность газовой смеси; C_d – коэффициент сопротивления, определяемый соотношением $C_d = \frac{24}{Re_p} \left(1 + \frac{Re_p^{2/3}}{6} \right)$; Re_p – критерий Рейнольдса для частицы. Полагается, что частицы стекла подаются в реактор со скоростью $U_{p,0}$

$$U_p|_{z=0} = U_{p,0}. \quad (11)$$

Из-за небольшой доли частиц в газовом потоке (для базового варианта объемная и массовая доля частиц соответственно равны $3,0 \cdot 10^{-6}$ и $3,6 \cdot 10^{-2}$), влиянием частиц на течение газа в реакторе можно пренебречь. Поэтому при такой постановке задачи нет необходимости в решении соответствующего уравнения движения для газа, а скорость газовой смеси рассчитывается на основе выражения

$$U_g = \frac{(G_g + G_{tr})}{\rho_g \pi R_0^2}. \quad (12)$$

Таким образом, математическая модель нагрева и движения частиц стекла в высокотемпературном газовом потоке включает в себя систему уравнений с граничными и начальными условиями (1)–(12). Коэффициент теплообмена и приведенная степень черноты, входящие в уравнения, определялись по соответствующим стандартным корреляциям [9–12].

Сопряженная задача нагрева и движения частиц в газовом потоке решалась совместно с температурной задачей для воздуха в рекуператоре итерационным методом, причем распределение температуры в частице на каждом шаге рассчитывалось методом прогонки.

Результаты и их обсуждение. Согласно поставленной задаче и сформулированной модели было проведено моделирование нагрева и движения частиц в высокотемпературном газовом потоке. В расчетах в качестве базового варианта выбраны следующие значения параметров: $R_0 = 0,15$ м, $H = 1$ м, $H_0 = 0,83$ м, $d_w = 3$ мм, $d_{int} = 7$ мм, $d_{ext} = 19$ мм, $G_g = 32$ г/с (соответствует мощности горелки 100 кВт), $G_p = G_{tr} = 1$ г/с, $G_a = 32$ г/с, $T_{g,0} = 1600$ °С, $T_{tr,0} = T_{p,0} = T_{a,0} = T_{env} = 20$ °С, $U_{p,0} = 2$ м/с и $d_p = 50$ мкм.

На рис. 2 приведены результаты моделирования, полученные при установленных (базовых) параметрах. Из рис. 2, а следует, что частицы, подаваемые в реактор, нагреваются до температуры, близкой к температуре газовой смеси на достаточно коротком начальном участке реактора ~0,05 м, затем, при дальнейшем движении, температура газового потока с частицами постепенно снижается за счет теплообмена со стенками реактора-рекуператора. Аналогичным образом ведут себя скорости газового потока и частиц в зависимости от высоты реактора, что показано на рис. 2, б.

Согласно результатам дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК) стекла, используемого для получения микросфер, в диапазоне температур 1348–1400 °С происходит выделение газообразного оксида серы SO₃. Именно выделение этого газа формирует полости внутри микросфер. Отсюда следует, что для формирования микросферы необходим ее нагрев до температуры не менее 1400 °С. По этой причине цель исследования заключалась в оптимизации параметров системы, при которых время пребывания частиц стекла в реакторе при условиях, когда ее температура выше 1400 °С Δt_{1400} была бы достаточной для образования полых микросфер.

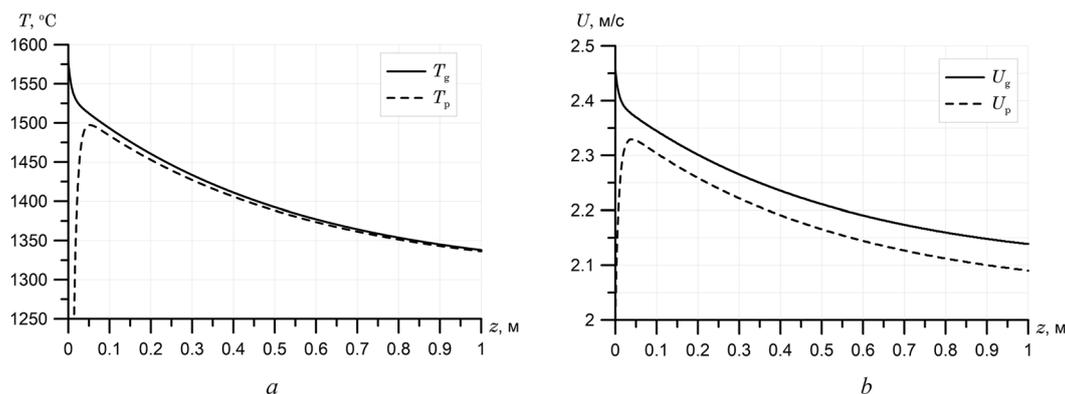


Рис. 2. Зависимости температуры газа и частиц (а) и их скорости (b) от высоты реактора
 Fig. 2. Dependences of the temperature of the gas and particles (a) and its velocity (b) on reactor height

Если предположить, что химические реакции диссоциации стекла происходят очень быстро, и процесс роста микросферы из частицы лимитируется диффузией растворенных газов в стекле, то в качестве минимального времени нахождения частицы в высокотемпературной зоне реактора можно использовать характерное время диффузии выделяющегося газа.

Для оценки характерного времени диффузии используется соотношение Эйнштейна $\langle x^2 \rangle = 2D\Delta t_D$ [13], где характерное расстояние диффузии x принимается равным радиусу частицы. Коэффициент диффузии для SO_3 в стекле оценивается соотношением $D_{\text{SO}_3} \approx D_{\text{He}} \sqrt{\frac{M_{\text{He}}}{M_{\text{SO}_3}}}$ на основе величины коэффициента диффузии для гелия в боросиликатном стекле [14] и с учетом того, что коэффициент диффузии газов обратно пропорционален квадратному корню из молярной массы газа. Используя закон Аррениуса, описывающий связь коэффициента диффузии и температуры, зависимость характерного времени диффузии от температуры можно выразить

$$\Delta t_D \approx \frac{d_p^2}{8D_{0,\text{SO}_3} \exp\left(-\frac{E}{R_g T}\right)}, \text{ где}$$

D_0 – предэкспоненциальный множитель; E – энергия активации; R_g – универсальная газовая постоянная. При увеличении температуры происходит снижение характерного времени, но следует отметить, что температура, до которой можно нагреть частицу горячим потоком дымовых газов, теоретически ограничена адиабатической температурой горения (для природного газа 1960 °C). По этой причине нагреть частицы даже до температуры выше 1500 °C практически очень сложно. Для базового размера частиц 50 мкм при температуре порядка 1400 °C, когда начинается активное выделение SO_3 в стекле, характерное время диффузии составляет около 150 мс. Поэтому в данной работе для базового размера частиц минимальное время, необходимое для образования полых микросфер, предполагается равным 150 мс.

На рис. 3 приведена зависимость времени нагрева частиц (параметра Δt_{1400}) от их диаметра

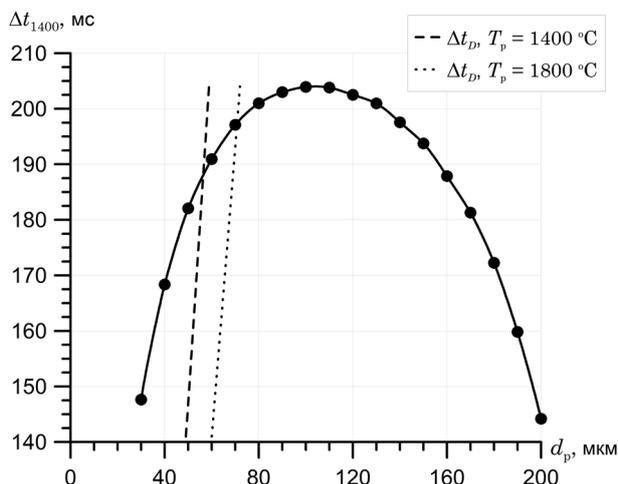


Рис. 3. Зависимость времени нахождения частиц в реакторе при температуре выше 1400 °C от диаметра частиц d_p при прочих базовых параметрах. Пунктирные линии – зависимости соответствующего времени диффузии от размера частиц при температуре 1400 и 1800 °C

Fig. 3. Dependence of the particle location time in the reactor at a temperature above 1400 °C on the particle diameter d_p with other basic parameters. Dashed lines are the dependences of the corresponding diffusion time scale on the particle size at a temperature of 1400 and 1800 °C

тра. Наличие максимума на графике указывает на диапазон оптимальных размеров частиц 80–120 мкм. Однако исходя из зависимостей характерного времени диффузии SO_3 при температурах 1400 и 1800 °С, изображенных на рис. 3 штриховой и пунктирной линиями, следует, что в частицах с большими размерами (>50 мкм) для формирования полых микросфер может быть недостаточно времени. Поэтому для рассмотренных условий оптимальным размером частиц является $d_p \leq 50$ мкм.

На рис. 4, *a* приведены зависимости времени нагрева частиц стекла при температуре выше 1400 °С от радиуса реактора при разных расходах дымовых газов. С увеличением расхода дымовых газов происходит рост времени нахождения частиц при температуре вышеустановленной Δt_{1400} . Также из приведенных зависимостей видно наличие максимума времени нагрева в рассматриваемом диапазоне радиусов реактора, причем не зависимо от расхода дымовых газов максимум соответствует приблизительно одному радиусу ($R_0 \approx 0,1$ м). Следует отметить, что при высоких расходах дымовых газов (в данном случае 32 г/с) и малых радиусах реактора (до 0,1 м) частицы достаточно быстро проходят зону реактора, в которой осуществляется формирование и образование полых микросфер. Однако несмотря на то что в этих случаях на выходе из реактора частицы имеют температуру выше 1400 °С, времени может быть недостаточно для окончательного образования микросфер при ограниченной (фиксированной) высоте данной зоны.

На рис. 4, *b* показаны зависимости температуры воздуха на выходе из рекуператора от радиуса реактора при разных расходах дымовых газов. Из рисунка следует, что при увеличении расхода дымовых газов температура воздуха на выходе из рекуператора растет, а при увеличении радиуса реактора данный параметр снижается. При установленных базовых значениях радиуса реактора и расхода дымовых газов температура воздуха на выходе из рекуператора равна 340 °С.

Изменение времени нахождения частиц в реакторе при температуре выше 1400 °С от начальной скорости частиц показано на рис. 5, *a*. Из рисунка следует, что с увеличением начальной скорости частиц происходит снижение рассматриваемого интервала времени, причем при сравнительно высоких скоростях (>1 м/с) это изменение происходит медленнее. Весь рассматриваемый диапазон начальных скоростей, в том числе и выбранная в качестве базовой начальная скорость частиц $U_{p,0} = 2$ м/с, соответствуют установленному минимальному времени нахождения частиц при температуре выше 1400 °С (≥ 150 мс).

Зависимости времени нахождения частиц в реакторе при температуре выше 1400 °С от начальной температуры дымовых газов представлены на рис. 5, *b*. Из рисунка следует, что при увеличении температуры дымовых газов происходит рост рассматриваемой характеристики.

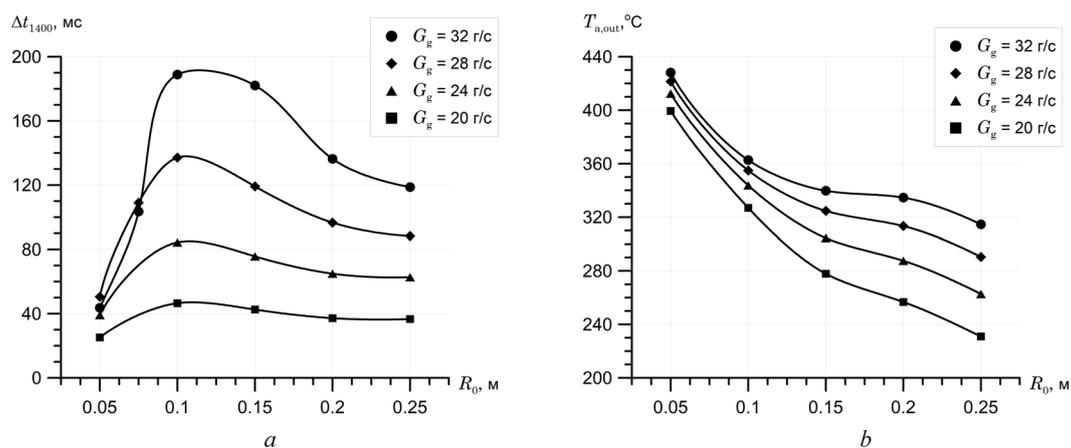


Рис. 4. Зависимости времени нахождения частиц в реакторе при температуре выше 1400 °С (*a*) и температуры воздуха на выходе из рекуператора (*b*) от радиуса реактора R_0 для разных расходов дымовых газов при прочих равных базовых параметрах

Fig. 4. Dependences of the particle location time in the reactor at a temperature above 1400 °С (*a*) and air temperature at the outlet from the recuperator (*b*) on the reactor radius R_0 for different mass flow of smoke fumes with other equal basic parameters

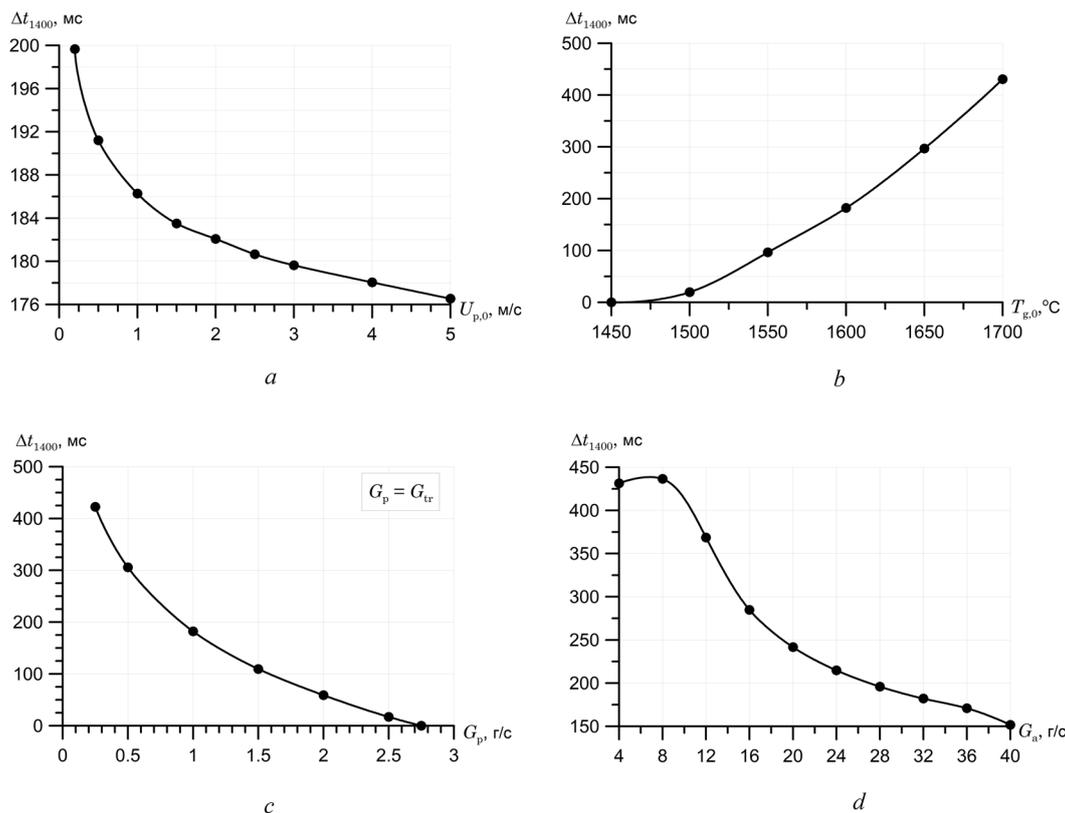


Рис. 5. Зависимости времени нахождения частиц в реакторе при температуре выше 1400 °С от начальной скорости частиц $U_{p,0}$ (a), начальной температуры газов $T_{g,0}$ (b), расхода частиц G_p (c) и расхода воздуха в рекуператоре G_a (d) при прочих базовых параметрах

Fig. 5. Dependences of the particle location time in the reactor at a temperature above 1400 °C on the initial particle velocity $U_{p,0}$ (a), the initial gas temperature $T_{g,0}$ (b), the particle flow rate G_p (c) and the air flow rate in the recuperator G_a (d) with other basic parameters

Однако следует отметить, что начальная температура дымовых газов (на входе в реактор) ограничена соответствующей адиабатической температурой горения.

На рис. 5, c приведена зависимость времени нахождения частиц в реакторе при температуре выше 1400 °С от расхода частиц. Из рисунка следует, что с ростом расхода частиц время их пребывания при температуре выше 1400 °С падает и при расходах $>2,7$ г/с частицы не нагреваются до установленной температуры. В данной работе в качестве базового значения расхода частиц используется 1 г/с (3,6 кг/ч), выбор которого связан с задачей получить необходимую продолжительность пребывания частиц в установленном интервале температур, не снижая при этом производительность установки.

Поскольку конструкция рассматриваемой установки по получению полых микросфер включает в себя рекуператор, интерес представляет исследование влияния расхода воздуха в рекуператоре на работу системы. На рис. 5, d приведена зависимость времени пребывания частиц в реакторе при температуре выше 1400 °С от расхода воздуха. Из представленных данных следует, что при малых расходах воздуха в рекуператоре тепловые потери на стенки реактора невелики, и частицы достаточно долго находятся в необходимом температурном диапазоне. Как упоминалось выше, управление расходом воздуха в рекуператоре дает эффективный дополнительный механизм управления технологическим процессом. Следует отметить, что в модели величина расхода воздуха и величина расхода дымовых газов не согласованы по принципу, что весь нагретый в рекуператоре воздух подается к горелке. В качестве базового расхода воздуха используется 32 г/с, что соответствует базовому расходу дымовых газов и предполагает возможность сброса определенного количества воздуха перед подачей его к горелке.

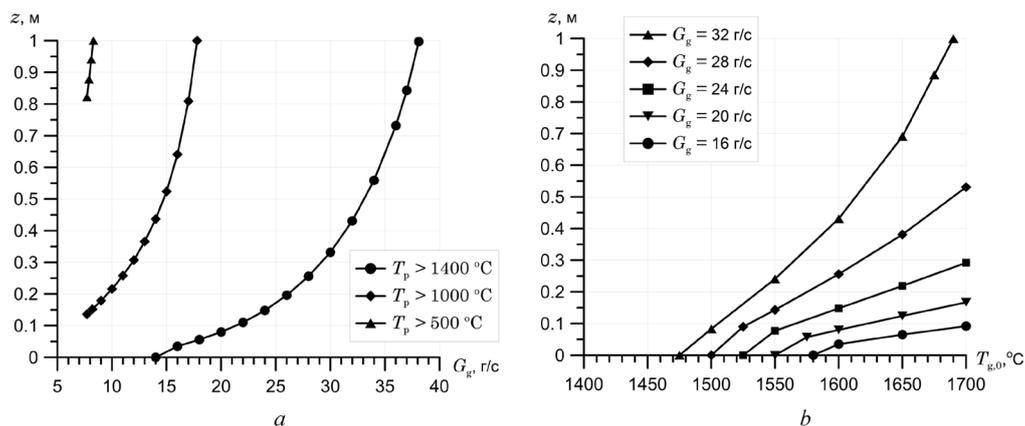


Рис. 6. Зависимости координаты точки внутри реактора, в которой температура частиц становится ниже 1400, 1000 и 500 °С, от расхода дымовых газов G_g (а) и координаты точки внутри реактора, в которой температура частиц становится ниже 1400 °С, от начальной температуры дымовых газов $T_{g,0}$ (б) при прочих базовых параметрах

Fig. 6. Dependences of the reactor height, at which the particle temperature becomes below 1400, 1000 and 500 °С, on the smoke fumes flow G_g (a) and the reactor height, at which the particle temperature becomes below 1400 °С, on the initial temperature of the smoke fumes $T_{g,0}$ (b) at other basic parameters

При проектировании установки по получению полых микросфер важным также является знание того, как по высоте реактора распределена температура частиц, в частности, на какой высоте прекращаются процессы формирования микросфер. На рис. 6, а приведены зависимости высоты реактора, на которой температура частиц снижается до величины 1400, 1000 и 500 °С соответственно, от расхода дымовых газов. С ростом расхода происходит увеличение размеров зоны реактора, в которой частицы находятся в соответствующем температурном диапазоне. Как уже было показано выше, при высоких расходах дымовых газов (в данном случае >38 г/с) частицы выходят из реактора высотой 1 м при температуре выше 1400 °С, а при малых расходах (<14 г/с) – не нагреваются до температуры в 1400 °С. При установленном базовом варианте параметров рассматриваемой системы частицы в реакторе нагреты до температуры выше 1400 °С вплоть до высоты около 42 см.

На рис. 6, б представлены зависимости координаты точки в рабочем пространстве реактора, в которой температура частиц становится ниже 1400 °С, от начальной температуры дымовых газов при различных расходах. Из рисунка следует, что с увеличением температуры газа на входе в реактор высота, на которой температура частиц соответствует установленным температурным диапазонам, возрастает, причем, чем выше расход дымовых газов, тем выше данная высота.

Закключение. В работе предложена модель, описывающая процесс получения стеклянных микросфер в газопламенном реакторе рекуперативного типа. На основе описанной математической модели нагрева и движения частиц в высокотемпературном газовом потоке, учитывающей сопряженный теплообмен между рабочей средой реактора и рекуператором, проведено моделирование и оптимизация соответствующих процессов по геометрическим и режимным параметрам. В качестве оптимизируемой характеристики использовалось время пребывания частиц стекла в реакторе при температуре выше 1400 °С.

В результате оптимизационных расчетов найдена область параметров реактора (диаметр и высота, расход природного газа, расход продуваемого через рекуператор воздуха), а также режимных параметров (диаметр и расход частиц стекла), в которых возможно формирование микросфер. Полученная информация может служить основой для проектирования эффективного газопламенного реактора для получения микросфер, а разработанная модель – для прогнозирования параметров реакторов других типоразмеров.

Благодарности. Авторы выражают благодарность заведующему отделом электродуговой плазмы Института тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси В. В. Савчину за предоставленные данные по свойствам стекла, используемого при получении микросфер.

Acknowledgements. The authors are grateful to the Head of Electric Arc Plasma Section of A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the NAS of Belarus V. V. Savchin for the provided data on the properties of the glass used in the preparation of microspheres.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Будов, В. В. Полые стеклянные микросферы. Применение, свойства, технология / В. В. Будов // *Стекло и керамика*. – 1994. – № 7/8. – С. 7–11.
2. Пахарев, А. В. Свойства тампонажного камня, сформированного в условиях скважины Томской области / А. В. Пахарев, К. В. Беляев // *Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море*. – 2012. – № 6. – С. 42–44.
3. Иноземцев, А. С. Полые микросферы – эффективный наполнитель для высокопрочных легких бетонов / А. С. Иноземцев, Е. В. Королев // *Промышленное и гражданское строительство*. – 2013. – № 10. – С. 80–83.
4. Структурообразование в полимерных композиционных материалах с полыми стеклянными микросферами / И. Д. Симонов-Емельянов [и др.] // *Пластические массы*. – 2012. – № 11. – С. 6–10.
5. Казимиренко, Ю. А. Формирование конструкций плавучих композитных сооружений для перевозки и хранения радиоактивных грузов / Ю. А. Казимиренко // *Технологический аудит и резервы производства*. – 2014. – Т. 6, № 5 (20). – С. 7–9.
6. Аппаратурное оформление химической металлизации полых стеклянных микросфер / А. Н. Симбиркина [и др.] // *Вопр. проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр.* – Харьков: ХАИ, 2016. – Вып. 1. – С. 109–122.
7. Многослойные конструкции со сферопластиками для изделий авиационной техники / И. И. Соколов [и др.] // *Конструкции из композиционных материалов*. – 2014. – № 1 (133). – С. 37–42.
8. German, M. L. Mathematical model for calculating the heat-protection properties of the composite coating “ceramic microspheres–binder” / M. L. German, P. S. Grinchuk // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. – 2002. – Vol. 75, N 6. – P. 1301–1313. <https://doi.org/10.1023/a:1022150523156>
9. Михатулин, Д. С. Конспект лекций по тепломассообмену / Д. С. Михатулин, А. Ю. Чирков. – Москва: Янус-К, 2008. – 2 ч.
10. Михеев, М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – 2-е изд. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.
11. Практикум по теплопередаче / А. П. Солодов [и др.]; под ред. А. П. Солодова. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 296 с.
12. Исаченко, В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипов, А. С. Сукомел. – М.: Энергия, 1981. – 416 с.
13. Einstein, A. Über die von der molekularinetischen Theorie der Wärme für die Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen / A. Einstein // *Annalen der Physik*. – 1905. – Vol. 322, N 8. – P. 549–560. <https://doi.org/10.1002/andp.19053220806>
14. Kawasaki, K. Permeation of Helium Gas through Glass / K. Kawasaki, K. Senzaki // *Japanese Journal of Applied Physics*. – 1962. – Vol. 1, N 4. – P. 223–226. <https://doi.org/10.1143/jjap.1.223>

References

1. Budov V. V. Hollow glass microspheres. Use, properties, and technology. *Glass and ceramics*, 1994, vol. 51, no. 7–8, pp. 230–235. <https://doi.org/10.1007/bf00680655>
2. Pakharev A. V., Belyaev K. V. Properties of a grouting stone formed in the conditions of a well in the Tomsk Region. *Stroitelstvo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more* [Construction of oil and gas wells on land and at sea], 2012, no. 6, pp. 42–44 (in Russian).
3. Inozemtsev A. S., Korolev E. V. Hollow microspheres are an effective aggregate for high-strength lightweight concrete. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitelstvo = Industrial and Civil Engineering*, 2013, no. 10, pp. 80–83 (in Russian).
4. Simonov-Emelyanov I. D., Trofimov A. N., Apeksimov N. V., Zubkov S. B. Structure formation in polymeric composite materials with hollow glass microspheres. *Plasticheskiye massy* [Plastic mixtures], 2012, no. 11, pp. 6–10 (in Russian).
5. Kazimirenko Yu. A. Formation of constructions of floating composite structures for transportation and storage of radioactive cargos. *Tekhnologicheskij audit i rezervy proizvodstva = Technology audit and production reserves*, 2014, vol. 6, no. 5(20), pp. 7–9 (in Russian).
6. Simbirkina A. N., Nefedov V. G., Chervakov O. V., Globa N. I. Hardware design of chemical metallization of hollow glass microspheres. *Voprosy proyektirovaniya i proizvodstva konstruksyy letatelnykh apparatov: sbornik nauchnykh trudov* [Questions of design and manufacturing of aircraft structures: collection of scientific papers]. Khar'kov, Kharkov Aviation Institute, 2016, iss. 1, pp. 109–122 (in Russian).
7. Sokolov I. I., Kogan D. I., Raskutin A. E., Babin A. N., Filatov A. A., Morozov B. B. Sandwich constructions with syntactic core for the aerospace parts. *Konstrukcii iz kompozitsionnykh materialov* [Composite materials constructions], 2014, no. 1(133), pp. 37–42 (in Russian).
8. German M. L., Grinchuk P. S. Mathematical model for calculating the heat-protection properties of the composite coating «ceramic microspheres–binder». *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2002, vol. 75, no. 6, pp. 1301–1313. <https://doi.org/10.1023/a:1022150523156>
9. Mikhatulina, D. S., Chirkov A. Yu. *Lecture notes on heat and mass transfer. 2 Parts*. Moscow, Yanus-K Publ., 2009 (in Russian).
10. Mikheev M. A., Mikheeva I. M. *Basic foundation of heat transfer*. Moscow, Energiya Publ., 1977. 344 p. (in Russian).
11. Solodov A. P., Tsvetkov F. F., Eliseev A. V., Osipova V. A. *Practical work on heat transfer*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986. 296 p. (in Russian).
12. Isachenko V. P., Osipov V. A., Sukomel A. S. *Heat transfer*. Moscow, Energiya Publ., 1981. 416 p. (in Russian).

13. Einstein A. Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen. *Annalen der Physik*, 1905, vol. 322, no. 8, pp. 549–560 (in German). <https://doi.org/10.1002/andp.19053220806>

14. Kawasaki K., Senzaki K. Permeation of Helium Gas through Glass. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1962, vol. 1, no. 4, pp. 223–226. <https://doi.org/10.1143/jjap.1.223>

Информация об авторах

Лях Мария Юрьевна – канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник. Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: liakhmaria@gmail.com.

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.

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

Information about the authors

Liakh Maria Yuryevna – 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.

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.

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.

СОЦИАЛЬНО-ГУМАНИТАРНЫЕ НАУКИ
SOCIAL SCIENCES AND HUMANITIESУДК 316.37
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-3-364-373>Поступило в редакцию 03.04.2018
Received 03.04.2018**И. В. Котляров***Институт социологии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь***ИСТОРИЧЕСКАЯ ПАМЯТЬ КАК ВАЖНЕЙШИЙ ФАКТОР
ЦИВИЛИЗАЦИОННОГО КОДА (СОЦИОЛОГИЧЕСКИЙ ДИСКУРС)***(Представлено академиком Е. М. Бабосовым)*

Аннотация. В рамках социологического подхода рассматривается дефиниция «цивилизационный код», определяется место и роль его основных факторов в системе белорусского общества. Среди них особое место занимает историческая память как один из важнейших элементов цивилизации. В работе раскрыты существенные черты и структурные элементы исторической памяти, ее роль в сохранении и укреплении социально-духовных оснований бытия, возможного использования исторического опыта в деятельности людей или возвращения его в сферу общественного сознания. Под исторической памятью можно понимать как отбор, воспроизводство и трансфер социального опыта, важного и необходимого для сохранения накопленных знаний и опыта, передачу их от поколения к поколению, как восприятие истории массовым сознанием, как совокупность представлений о прошлом, существующих в обществе как на массовом, так и на индивидуальном уровне, включая когнитивный, образный и эмоциональный аспекты. Показано, что на переломных изломах истории, при переходе общества от одного качественного состояния к другому, историческая память может использоваться как инструмент идеологической борьбы и целенаправленного влияния на массовое сознание, быть наполнена специфическим информационным содержанием по запросам различных социальных групп и политических элит.

Ключевые слова: история, социология, цивилизация, цивилизационный код, будущее, прошлое, мониторинг, историческая память, идеологическая борьба, ценности, традиции, менталитет

Для цитирования: Котляров, И. В. Историческая память как важнейший фактор цивилизационного кода (социологический дискурс) / И. В. Котляров // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2018. – Т. 63, № 3. – С. 364–373. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-3-364-373>

Igor V. Kotliarov*Institute of Sociology of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus***HISTORICAL MEMORY AS THE MOST IMPORTANT FACTOR OF THE CIVILIZATIONAL CODE
(SOCIOLOGICAL DISCOURSE)***(Communicated by Academician Evgenii M. Babosov)*

Abstract. Within the framework of the sociological approach, the definition of “civilizational code” is considered, the place and role of its main factors in the system of Belarusian society are determined. Among them is a special place occupied by historical memory as one of the most important elements of civilization. The work reveals the essential features and structural elements of historical memory, its role in preserving and strengthening the socio-spiritual foundations of being, a possible use of historical experience in the activities of people or its return to the sphere of social consciousness. By historical memory are understood the selection, reproduction, and transfer of social experience, which is important and necessary to preserve accumulated knowledge and experience, their transfer from generation to generation, as the perception of history by mass consciousness as a set of ideas about the past existing in society both at a mass and individual level, including cognitive, imaginative, and emotional aspects. It is shown that on the turning points of history, at a transition of society from one qualitative state to another, historical memory can be used as an instrument of ideological struggle and purposeful influence on mass consciousness and filled with a specific information content at the request of various social groups and elites.

Keywords: history, sociology, civilization, civilizational code, future, past, monitoring, historical memory, ideological struggle, values, traditions, mindset

For citation: Kotlyarov I. V. Historical memory as the most important factor of the civilizational code (sociological discourse). *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2018, vol. 62, no. 3, pp. 364–373 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-3-364-373>

Современный мир переживает перманентную целенаправленную трансформацию, вызванную активной реализацией теории «управляемого хаоса» как стратегии конкретной социальной практики. Началась она с уничтожения биполярной системы международных отношений, разрушения Советского Союза и социалистической Югославии, распада Чехословакии. Затем были бомбежки суверенного европейского государства Союзной республики Югославии. По Ближнему Востоку прокатилось цунами «цветных революций». По мнению американских политиков, пространство ближневосточного региона и Магриба должно быть радикально зачищено для того, чтобы создать здесь условия для приращения американских ценностей с элементами западной демократии.

А между этими событиями была страшная трагедия в беднейшей африканской стране Руанда, жившей ненавистью противостояния этнического меньшинства – тутси и хуту, составлявших 90 % населения страны. Хуту, вооруженные ружьями, дубинками и мачете, убивали тутси, сжигали их жилища, насиловали женщин и детей. За несколько недель в страну было ввезено более пятисот тысяч мачете. В столице Руанды Кигали постоянно был слышен звук мачете, которыми с угрозой скребли по мостовой. Может быть, через 12 лет именно эти мачете вонзались в тела жителей европейских городов, чиркали по камням Берлина, Лондона и Парижа.

Можно ли было остановить насилие в Африке и Ближнем Востоке, резню в Руанде, бомбардировки в Ливии, банды наемников в Сирии? Можно, но не остановили. Как результат, сегодня на наших глазах происходит раскодирование мира. Создаются новые матрицы для неясных, но возможных проблем в будущем. Новый миропорядок рождается в горе и слезах, в смертях и крови, в страданиях и муках. Полем сражения становится когнитивное пространство, ментальная сфера, интеллект и менталитет народов, их национальная и культурная идентичность.

Будущее завораживает, манит и пугает одновременно. Оно способно вызывать широчайший спектр чувств: от удивления и неприязни до иронии и торжества несправедливости. Количество перемен переходит в исключительно отвратительное качество, и не известно, чего ждать человечеству в дальнейшем. Предсказывая будущее, люди часто испытывают тревожные чувства, детерминируемые объективной реальностью, активно навязываемые фильмами-ужасниками и литературными катастрофами, основанными на торжестве животных инстинктов над человеческим разумом.

Как утверждают многие современные ученые, будущее можно проектировать, моделировать, программировать. Главный герой известного фильма «Терминатор-2. Судный день» был убежден, что «будущее не определено. Нет судьбы, кроме той, что мы творим сами». Все совершенно справедливо. В период формирования шестого технологического уклада, в который входят нанотехнологии, клеточные технологии, методы геномной инженерии и другие источники знаний, в эпоху сознательного моделирования представлений и эмоциональных оценок прошлого, настоящего и будущего, особое значение имеет тщательное изучение источников, методов и технологий защиты от целенаправленного насилия над ценностными и мотивировочными основаниями социальной действительности.

В Институте социологии НАН Беларуси постоянно проводятся многочисленные социологические исследования, направленные на изучение объективной социально-политической и культурно-исторической реальности. Исследования показывают, что белорусские нация и государство состоялись, что они имеют исторические, национальные и социокультурные историю и традиции, ценности и особенности, идеологию и менталитет, которые во многом детерминируют развитие современного мировоззрения и влияют на формирование будущих моделей белорусского государства. Однако для того, чтобы более детально их изучить, ученые института вышли на идею научного определения влияния различных субъективных факторов и объективных причин на развитие национального государства, создание парадигмы цивилизационного

кода белорусского общества как важнейшего инструмента изучения воздействия прошлого на настоящее и будущее.

Необходимо, прежде всего, понять, что такое кодирование в гуманитарной сфере и что такое цивилизационный код. Что составляет парадигму его развития? Геополитическое положение? Идеология? Смысл жизни? Религия? Фундаментальные ценности? Менталитет? Культура? Ум и интеллект? Идентичность? Хозяйственный уклад? Способ мышления? Если взять какой-либо из этих компонентов за основу, то это будет экстраполяция парадигмы монистического анализа на цивилизационный контекст развития общества, что совершенно не верно.

По нашему мнению, кодирование – это специфический способ мыслительной деятельности, создание своеобразного коммуникационного пространства, которое имеет свою структуру, функции, динамику и представляет специфическую модель окружающей действительности. При помощи кодирования происходит формирование и передача информации от одного источника к другому. Причем, по мнению известного ученого Михаила Лотмана, кодирование не прибавляет каких-то новых знаний к уже имеющимся, его задача – трансформировать уже имеющиеся знания и сведения, перевести их в уже существующую систему значений [1].

А что такое код? Многочисленные споры вокруг данного вопроса детерминированы, прежде всего, расширением сферы семиотики, сближением лингвистических и логико-семантических исследований, использованием в семиотических трудах социологического, кибернетического, информационного подходов, структурно-функциональных методов. В современной социологической науке до сих пор отсутствует общепринятое понимание кода, нет точного представления, когда эта дефиниция появилась в социологии.

Кодирование непосредственно связано с разработкой логических языков, изучением процессов искусственного порождения и дешифровки текстов, автоматического анализа его содержания. Известный исследователь Умберто Эко в знаменитой работе «Отсутствующая структура. Введение в семиологию» утверждал, что «необходимость в коде возникает тогда, когда происходит переход от мира сигналов к миру смысла. Мир сигналов – это мир отдельных единиц, рассчитываемых в битах информации, а мир смысла – это значащие формы, организующие связь человека с миром информации, с миром идей, образов и ценностей данной культуры» [2]. По его мнению, «код – это структура, представленная в виде модели, выступающая как основополагающее правило при формировании ряда конкретных сообщений, которые благодаря этому и обретают способность быть сообщаемыми» [2, с. 44].

В теории коммуникации код является важнейшим фактором восприятия и понимания сообщения, в криптографии означает «секретное, условленное сочетание цифр или букв, дающее право доступа куда-либо или к чему-либо» [3, с. 436].

В современную социологию и семиотику понятие «код» пришло из теории информации, где он понимается как «совокупность правил отображения элементов одного набора на элементы второго набора. Элементами могут быть знаки или цепочка знаков. Первый набор называется кодовым набором, а второй – набором элементов кода. Код данных – система, образуемая кодовым набором и правилами, по которым из элементов этого кодового набора строят данные при кодировании» [4, с. 53].

Код, по нашему мнению, это комплекс условных обозначений (или сигналов) для записи (или передачи) заранее определенных понятий, система (структура), носящая осознанный характер, обусловленная договоренностью, обладающая регулятивной и системообразующей функциями в информационных и коммуникационных процессах; выступающая основополагающим правилом при формировании конкретных сообщений.

Таким образом, код – это способ передачи определенной информации: знаний о мире и социального опыта, навыков и умений в данной социокультурной среде, а в его смысловом значении лежит аттитюд об устойчивом комплексе формальных и неформальных принципов и правил, норм и установок, регулирующих взаимодействие людей в определенной области жизнедеятельности и организующих его в систему ролей и статусов и способных быть основой формирования и развития цивилизационных отношений [5; 6].

Операционализация понятия «цивилизационный код» в современной социологической теории является достаточно сложным и динамичным проблемным полем, что подчеркивает объективные затруднения при формировании дефиниции такого обширного по содержанию феномена. Это во многом объясняется сложной природой самого явления, многовариантностью и разнообразием, неоднозначностью и многоаспектностью его содержания, неординарностью структуры, многообразием форм проявлений. Кроме того, вопросы цивилизационного кода рассматриваются различными авторами в различных исторических, социально-экономических и политических условиях, в зависимости от их личной точки зрения и гражданской позиции, отношения к действительности. Важен поиск реперных точек, при соединении которых возникает территория трансляции смыслов социальной реальности цивилизационного кода.

Предлагаю следующее авторское определение: цивилизационный код – это исторически сложившаяся система, особая комбинация символов, знаков, сигналов, средств антропологического и социокультурного характера, определенных коммуникаций (отношений), элементов самовыражения, своеобразных маркеров, формирующих социальное пространство национальной реальности и благодаря которым передается накопленный социальный опыт и смысл жизни от поколения к поколению, идеалы цивилизации воспроизводятся в сознании людей, которые адекватно воспринимают и реагируют на происходящие пространственно-временные процессы [5–7].

Цивилизационный код предполагает наличие в социуме определенной системы доминирующих ценностей и смыслов, взглядов и традиций, форм общения и социальных укладов, исторической памяти и мировоззрения, поведенческих форматов и знаний, умений и навыков. Именно они детерминируют развитие нации и общества, передаются от поколения к поколению через образование и воспитание, позволяют минимизировать риски и вызовы, сами формируются в процессе исторического развития, интеллектуального и морально-нравственного воспитания. Цивилизационный код включает совокупность знаний и искусственных способов деятельности, которыми обладает социальность (социокоды) и которые могут также передаваться социальными субъектами генетически. Следует особо подчеркнуть, что процессы передачи социальной информации во временном пространстве гораздо менее запрограммированы, чем процессы передачи генетической информации, так как отсутствует фатальная неизменность воспроизводства сложившихся общественных отношений. Каждое новое поколение постоянно находится перед выбором: что из наследия отцов, утратившее свою непосредственную практическую ценность, необходимо сохранить или забыть, а что из сохраненного использовать, но уже в новом качестве [8].

Цивилизационный код – это целостный, устойчивый, идущий через многие столетия комплекс часто неосознаваемых социальных и культурных предписаний, поведенческих установок и практик. Он достаточно сложен и эффективен, отлажен, но постоянно меняется, учитывая вызовы времени и социальной реальности. Цивилизационный код, по терминологии известного ученого Михаила Петрова, является так же и социальным геном [9].

Цивилизационный код, согласно теории Пьера Бурдьё, можно понимать как социальное поле, в котором тесно взаимодействуют основополагающие, системообразующие характеристики, связанные с определенными поведенческими и ментальными стереотипами, духовной идентификацией, коллективными представлениями общества, различными социальными и идеологическими ориентациями. Поле представляет собой конкретно заданный тип игры, в нем имеется своя логика или свои правила игры. При этом в поле цивилизационного кода можно выделять субполя, например, культуры (в узком смысле), образования, здравоохранения, спорта, туризма, которые постоянно взаимодействуют друг с другом. Социальная структура в многомерном пространстве цивилизационного кода детерминируется позициями агентов, определяемыми в свою очередь общим объемом социального капитала и удельным весом стратегий поведения и базовых ценностей, культурных и религиозных, духовных и этнических характеристик и т. д. [10].

Социальное пространство цивилизационного кода можно понимать как пространство коммуникативное. Взаимодействие происходит как на уровне хронологическом, так и на уровне топологическом, способствуя самоидентификации цивилизационного кода, выделению его структурных элементов и смысловых элементов. Социальное пространство цивилизационного кода – это особый коммуникативный феномен, где коммуникация между локальными цивилизациями

осуществляется в ходе диалога между ними, через формирование особого коммуникационного поля смыслового взаимодействия [10].

Что входит в его структуру? Цивилизационный код предполагает при всех экономических и идеологических, политических и социальных различиях комплекс определенных смыслообразующих факторов, характерных черт, фундаментальных ценностей, долговременных признаков, культурных и религиозных, духовных и этнических характеристик, исторических традиций, особенностей менталитета.

Цивилизационные различия кода включают в себя показатели этничности, ментальности, конфессиональности, гражданственности, языка, культуры, традиций, образования, устоев, укладов, территории, общности исторической судьбы, коллективной памяти и т. д. Проявляют они себя в рефлексивной и социально-поведенческой культуре, психологии, ментальности. Джордж Мэрдок называл семьдесят универсалиев, которые могли бы быть нами отнесены к особым элементам цивилизационного кода. Среди них – этика, мораль, религия, тип семьи, мифология, фольклор, музыка, особенности невербального общения, игры, танцы, спорт и т. п. [11].

По мнению известного российского исследователя Александра Никифорова, цивилизационный код любого общества – сложный феномен и состоит из нескольких кластеров: мировоззренческого (алгоритмы распознавания/восприятия информации), летописного (набор источников кода, включая достоверные исторические данные), фактологического (умение работать с информацией; выражается в прикладных технологиях, включая разного рода идеологии), экономического (обеспечение узлов, элементов, механизмов системы, исходя из выбранной модели управления), генетического (забота о людях как о материальных носителях кода) [12].

Одним из важнейших структурных носителей цивилизационного кода является историческая память. Прежде всего, следует понять, что такое память. «Память, – подчеркивает известный философ-экзистенциалист Мартин Хайдеггер, – это собрание мыслей. Мыслей о чем? О том, что держит нас в нашей сущности постольку, поскольку мы его мыслим. В какой мере мы должны мыслить держащее нас? А в той, в какой оно испокон века является тем, что должно осмыслиться. Когда мы осмысливаем его, мы одариваем его воспоминанием. Мы отдаем ему воспоминание, потому что оно желанно нам как зов нашей сущности» [13, с. 140]. Память – это нравственное качество, которое делает людей людьми. Она представляет собой напоминание о сущности и быстротечности времени. Важно помнить о прошлом, о совершенных поступках и принятых решениях, в погоне за лучшей жизнью не топтать настоящее, не издеваться над будущим. Прошлое – величина постоянная. Что было, то есть. Оно навеки, навсегда в нашей памяти.

История – один из объектов памяти. Важно помнить, понимать и уважать историю. История – это не просто череда событий и фактов, дат и имен. Это, прежде всего, понимание истинных причин и взаимосвязей различных явлений и событий, причем причин глубинных, уходящих истоками во времена, часто бесконечно далекие от тех, когда эти явления и процессы происходили. Важно понимать, что в истории все взаимосвязи и факты, явления и процессы, события и люди, причины и следствия связаны друг с другом. История – это алгоритм этих причин и следствий, где каждое действие взаимодействует с предыдущим и влияет на последующее, а историческая память способна, прежде всего, обезопасить человека от повторения многих разрушительных ошибок. Только порядочный ученый, анализируя цепочку замысловато переплетенных событий и причинно-следственных связей, способен увидеть и понять истинный смысл исторических событий, запомнить и запечатлеть его на различных носителях, не насилуя ради сиюминутных выгод недалеких политиков. В истории кодируется культурное наследие, опыт и мудрость предыдущих поколений. Ложное толкование исторических фактов уводит последующие поколения от понимания того, как это было на самом деле, от той действительной опоры, от того фундамента, на котором находится современное общество.

История – это реализация конкретного цивилизационного кода. В истории нет ничего случайного, она сама выбирает героев. Великий русский поэт А. С. Пушкин отмечал, что историю дал нам Бог, и она в принципе не могла быть иной. Исторические достижения белорусского народа всегда опирались на национальное сознание и менталитет, нравственность и духовность, культурные традиции, интересы и ценности. Именно в прошлом содержатся уроки, которые

важно усвоить, чтобы уверенно двигаться в будущее. Но в истинном, а не придуманном прошлом. История социально детерминирована. Она формирует образы и символы, апеллирует к прошлому, к традициям, закрепляет смыслы и канонизирует ценности, связывает прошлое, настоящее и будущее многих поколений, делая их народами с неповторимой парадигмой развития.

В рамках цивилизационного кода важно раскрыть сущностные черты и структурные элементы исторической памяти, ее роль в сохранении и укреплении социально-духовных оснований бытия, возможного использования исторического опыта в деятельности людей или возвращения его в сферу общественного сознания. Тем более, что для социологии социальный опыт прошлого является одним из важнейших объектов исследования. Таким образом, историческую память можно понимать как фиксацию, хранение, воспроизводство и трансфер социального опыта, изложенного в ретроспективной информации о ключевых событиях, как отбор знаний и опыта, образов и образцов прошлого, передачу их от поколения к поколению, как восприятие истории массовым сознанием, как совокупность представлений о прошлом, которые существуют в обществе как на массовом, так и на индивидуальном уровне, включая когнитивный, образный и эмоциональный аспекты.

Историческая память – сложно структурированный элемент духовной жизни общества. Ее основу составляют несколько объектов, которые обладают определенной иерархией, структура которой зависит от исторического и социального контекстов. Иногда различные подсистемы вступают в конфликт между собой. Выбор доминирующего объекта патриотизма имеет ситуативный характер и определяется социальным контекстом. Историческая память сохраняет для общества глубинные, жизненно важные смыслы и идеалы, образы и ценностные ориентации, традиции и стереотипы, фиксируется в комплексе символов и значений, передающихся от одного поколения к другому через фольклорные традиции и обряды, верования и государственную символику, литературные произведения и т. д. В основе исторической памяти находятся социальный опыт, воспоминания и временные процессы. Социальным субъектам через ментальные каналы, насыщенные энергией чувств, пережитых в прошлом людьми, открывается и сохраняется общественно ценная и важная для будущих поколений информация. Одной из важнейших функций исторической памяти является передача исторически конкретному человеку, а через него – целым поколениям людей совокупности социальной ранее созданной информации [8].

Коллективный опыт, сформированный в процессе развития образных представлений о мире, составляет теоретическое ядро исторической памяти. В содержание исторической памяти как важного фактора цивилизационного кода входит информация, зафиксированная в предметах материальной культуры, в сложившихся социальных отношениях, в практических нормах поведения, в навыках трудовой деятельности и других социальных связях и структурах, воспроизводимых с помощью опыта и традиций. Открытия будущего находятся в недрах прошлого, социальный опыт предков наполняется актуальным содержанием, направленным на развитие будущих поколений.

«Прошлое всегда с нами, и все, что мы собой представляем, все, что мы имеем, исходит из прошлого. Мы его творение, и мы живем, погруженные в него. Не понимать этого и не ощущать прошлое... значит, не понимать настоящее», – утверждал Д. Неру, один из величайших политиков мира, лидер индийского национально-освободительного движения [14].

Российский социолог Виталий Ружа выделяет следующие качественные признаки исторической памяти: взаимная детерминация памяти индивидов и групп; воспоминания всегда являются реконструкцией; неизменность прошлого в памяти индивидов; темпоральность воспоминаний; утрата воспоминаний; историчность (приспособление к новым условиям) коллективной памяти; управляемость памятью (полная или частичная утрата); память о прошлом и формируется, и деформируется одновременно [15].

К основным процессам исторической памяти относятся запоминание и сохранение, забывание и восстановление информации. Социальными механизмами (институтами) освоения прошлого являются школа и вуз, политические институты и художественная литература, средства массовой информации и мемориальные комплексы (музеи и памятники), которые обеспечивают участие ретроспективной информации в формировании мировоззрения личности. Однако здесь

выявляется еще одна очень важная проблема: резкое падение интереса к истории. История должна формировать патриотизм, а не вносить раскол между регионами, поколениями, социальными группами.

Историческая память кристаллизуется через временные или символические, пространственные «сгустки» памяти, печать прошлого, востребованного настоящим: места поклонения, праздники, с которыми общество связывает прошлое, мемориалы, музеи, юбилеи. Память является символическим способом удержания и запоминания содержания прошлого, тем самым меняются ее социальные функции. Она становится способом конструирования социального настоящего и будущего, инструментом социализации и идентификации последующих поколений и отдельных групп. Эти места сохранения памяти постоянно конструируются и реконструируются соответственно запросам настоящего [8; 15; 16].

Основными носителями исторической памяти являются социальные субъекты как участники событий; овеществленные источники знаковой информации и средства ее передачи; вещественные объекты, которые могут быть и не предназначены для передачи социальной и исторической информации (например, орудия труда в широком смысле слова).

К социальным факторам, влияющим на рост объема, плотности и хронологической глубины исторической памяти, относятся количество населения; увеличение продолжительности жизни; повышение уровня культуры, грамотности и т. д. Факторами ускоренного развития исторического процесса являются «уплотнение» и «ускорение человеческой истории», ее «наполненность». Таким образом, можно сделать вывод, что объем исторических событий прямо зависит от социальной деятельности конкретных людей. К факторам дезорганизации относятся (кроме естественного старения носителей информации) их гибель в результате стихийных бедствий, войн, революций и борьбы в классовом обществе. Общество, потерявшее историческую память, перестает ощущать себя субъектом истории, так же как отдельный человек, потерявший память, теряет свою личность [8; 15; 16].

Как утверждают многие исследователи, любая социальная общность насчитывает несколько поколений предков, которые «населяют» область бессознательного и управляют этой ментальной территорией. Гюстав Лебон утверждал, что судьбой народов в гораздо большей степени руководят прошлые поколения, чем живущие в настоящее время [17]. Это достаточно сложный амбивалентный подход, который имеет право на существование. В тяжелые исторические периоды, когда происходит переход общества от одного качественного состояния к другому, всегда находятся политики и ученые, теоретики и практики, которые целенаправленно «корректируют» исторические факты для «правильного» понимания современных событий, причем подведя под это научную основу. Вспомним Фридриха Ницше, который утверждал, что «настоящее же, то есть бытие, не нуждается в памяти» [18]. Трудно согласиться с ним и с его современными последователями, которые активно занимаются «критическим переосмыслением прежних оценочных критериев в новой парадигме». Они, ссылаясь на Ф. Ницше, пытаются переписать историю, утверждая, что события прошлого имеют ценность и значения только для того периода времени.

В таких условиях прошлый исторический опыт теряет устойчивость, последующие поколения не принимают его «на веру»: появляется опасность, что этот опыт или его часть будут полностью утеряны. Как показывают социологические исследования, исторической памятью, в которой заложены сведения и символы, соединяющие людей в общество и обеспечивающие наличие в нем общего языка и устойчивых каналов общения, можно умело манипулировать [19]. Тогда вновь на передний план выходят профессиональные осквернители истории, которые целенаправленно насилуют историческую память. Они натравливают поколение на поколение, ссорят отцов с детьми, дедов с отцами, верующих с неверующими, русского с русским, всех русских со всеми нерусскими.

Вспомним Джорджа Оруэлла, «отсюда же следует, – цитирую его роман «1984», – что, хотя прошлое изменчиво, его ни в какой момент не меняли. Ибо если оно воссоздано в том виде, какой сейчас надобен, значит, эта новая версия и есть прошлое и никакого другого прошлого быть не могло» [20]. Однако в структуре цивилизационного кода любого общества имеются стабилизирующие элементы, возвращающие общество к глубинным смыслам понимания прошлого. Это

коды исторической памяти, которые содержат социокультурные и смысловые начала общности, на них основаны ментальные и поведенческие особенности настоящих поколений. Эта борьба достаточно четко прослеживается сегодня, когда многие знаковые события как для белорусского общества, так и для всего человечества, преподносятся совершенно по-разному, а учебные пособия и средства массовой информации откровенно лгут, используя фашистские идеологические методы.

Например, для подавляющего большинства жителей Беларуси Великая победа Великого народа в Великой войне – это главное событие прошлого столетия. Социологи спрашивали: «Какие чувства Вы испытываете в связи с Победой нашей страны над фашистской Германией, освобождением Беларуси от фашистов?». 95,8 % жителей страны ответили – чувство благодарности участникам войны, спасшим страну от порабощения, чувство гордости за страну, победившую фашизм. Историческая память о Великой Отечественной войне, освобождении Беларуси от немецко-фашистских захватчиков является смыслообразующим элементом духовного настроения белорусского народа, фактором его сплочения и мобилизации на преодоление имеющихся проблем, на решение стоящих перед ним экономических, социальных и политических задач [19].

Вдруг совершенно неожиданно нашлись люди, которые глумятся над памятью миллионов погибших воинов. И самое страшное, что это наши соседи, чьи предков своей грудью заслонили советские солдаты и чьи памятники теперь уничтожаются, а могилы оскверняются. В условиях глобального противостояния именно раскодирование исторической памяти является своеобразной «артподготовкой», которая создает реальные возможности для нанесения мощных идеологических и финансовых, экономических и геополитических, психолого-исторических и других ударов ярых врагов белорусского народа. Кроме того, уничтожение исторической памяти – это целенаправленная трансформация сознания, направленная на разрушение и изменение когнитивного поля.

Историческая память имеет свойство бледнеть, меркнуть, истончаться с годами, растворяться во времени, особенно под целенаправленными атаками нечистоплотных и юродствующих историков, журналистов, писателей. Однако если каждый гражданин, государство и гражданское общество с уважением относятся к своему прошлому, каким бы сложным оно не было, к могилам своих предков, к сединам отцов, то формируется нация, народ, любящие, уважающие Родину. Если же часть нации, пусть даже и продвинутая, уничтожает память, разрушает памятники, обливает грязью историю, то в этой стране обязательно вырастут такие люди, которые через некоторое время, повторяя опыт старших товарищей, уничтожат все, что эти старшие товарищи делали.

Важными компонентами исторической памяти являются традиции и обычаи, которые, несмотря на динамизм общественного развития и существенное увеличение социального пространства и информации, являются важнейшими механизмами передачи духовных ценностей и социального опыта, сохранения того лучшего, что было у предков. Традиция есть способ создания знаковой системы памяти о прошлом. Они являются формами движения общества в будущее, так как придают развитию направленность, освобождают его от неоправданных метаний и колебаний.

Традиции нужно беречь, добиваться, чтобы люди не стали бы «манкуртами», не помнящими родства. Если в обществе нет своих традиций, то люди будут воспринимать культуру чужих государств. В таком случае теряется лицо народа, его самобытность. Зачем копировать образ жизни других социальных групп и национальностей, как сейчас иногда делается, отвергая жизненный опыт собственной Родины?

Белорусские государство и общество ценят, помнят и уважают свои традиции. Для многих жителей Беларуси Великий Октябрь был победой социальной справедливости. Он остался им и сейчас. Может быть поэтому социальная справедливость как ценность для белорусов является не пустым словом. Красный флаг над Рейхстагом, пропитанный кровью наших дедов, – это тоже традиция. Он и сегодня гордо реет над одним из символов белорусской столицы – Музеем истории Великой Отечественной войны. И пятилетний мальчишка, который раньше родителей бежит в этот музей, будет прекрасным хранителем и продолжателем традиций. И пусть у него

в будущем в жизни будет много музеев, но этот останется главным в его жизни, а у Беларуси, пока в Музей истории Великой Отечественной войны «не зарастет народная тропа», гарантировано прекрасное будущее. Социологические исследования показывают, что если не ломать, не уничтожать традиции, не идти на колоссальные цивилизационные риски и издержки, связанные с уничтожением всего того лучшего, что есть, то народ, нация, общество будут успешно развиваться и целенаправленно идти вперед. Не так, как это происходит у некоторых наших соседей, где граждане оскорбляют друг друга, морально и физически убивают, глумятся над памятью предков, разрушают их могилы, уничтожают символы и памятники.

Бездумное копирование матрицы развития других народов приводит к сужению исторической перспективы. В Беларуси на основе исторической памяти необходимо разработать национальную цивилизационную систему ценностей, подстроить под нее образовательный, информационный процесс, сформулировать национальную идею и идеологию белорусского государства и донести их до широких слоев населения через систему образования и средства массовой информации, культуру и политику.

Список использованных источников

1. Лотман, Ю. М. Семиосфера. Культура и взрыв. Внутри мыслящих миров. О семиотическом механизме культуры / Ю. М. Лотман. – СПб.: Искусство-СПБ, 2000. – 485 с.
2. Эко, У. Отсутствующая структура. Введение в семиологию / У. Эко. – СПб.: Symposium, 2006. – 540 с.
3. Значение слова «код». Русский язык как государственный [Электронный ресурс]. – Режим доступа: rus-gos.spbu.ru/index.php/words/show/7755. – Дата доступа: 15.01.2015.
4. Кловский, Д. Д. Теория передачи сигналов / Д. Д. Кловский. – М.: Связь, 1984. – 376 с.
5. Беларусь на пути в будущее: социологическое измерение / И. В. Котляров [и др.]. – Минск: Беларуская навука, 2015. – 499 с.
6. Котляров, И. В. Цивилизационная парадигма белорусского общества: теоретико-методологические основания / И. В. Котляров // Весці Нац. акад. навук Беларусі. Сер. гуман. навук. – 2016. – № 4. – С. 20–32.
7. Белорусское общество в контексте цивилизационно-культурного кода: социологическое измерение / И. В. Котляров [и др.]. – Минск: Беларуская навука, 2017. – 392 с.
8. Илизаров, Б. С. Роль ретроспективной социальной информации в формировании общественного сознания (В свете представлений о социальной памяти) / Б. С. Илизаров // Вопр. философии. – 1985. – № 8. – С. 60–69
9. Петров, М. К. Язык, знак, культура / М. К. Петров. – М.: Едиториал УРСС, 2004. – 328 с.
10. Бурдые, П. Социология политики / П. Бурдые. – М.: Socio-Logos, 1993. – 403 с.
11. Багдасарян, В. Концепция цивилизационного генокода: цивилизации как живые системы [Электронный ресурс] / В. Багдасарян. – Режим доступа: <http://rusrand.ru/forecast/konceptsiya-civilizacionnogo-genokoda-civilizacii-kak-zhivye-sistemy>. – Дата доступа: 15.01.2015
12. Культура как бизнес: не всем дано, но для каждого [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://kob-media.ru/?p=25878>. – Дата доступа: 15.01.2015
13. Хайдеггер, М. Разговор на проселочной дороге / М. Хайдеггер. – М.: Высшая школа, 1991. – 192 с.
14. Неру, Дж. Открытие Индии / Дж. Неру. – М.: Политиздат, 1989. – 460 с.
15. Ружа, В. А. Патриотическая культура и ее измерения [Электронный ресурс] / В. А. Ружа // Современные исследования социальных проблем. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/patrioticheskaya-kultura-i-ee-izmereniya>. – Дата доступа: 15.01.2015
16. Рождественская, Е. Ю. Социальная память как объект социологического изучения / Е. Ю. Рождественская, В. В. Семенова // ИНТЕР. – 2011. – Т. 1, № 6. – С. 27–48.
17. Лебон, Г. Психология народов и масс / Г. Лебон. – СПб.: Макет, 1995. – 311 с.
18. Ницше, Ф. О пользе и вреде истории для жизни: в 2 т. / Ф. Ницше. – М.: Мысль, 1990. – Т. 2. – С. 158–230.
19. Котляров, И. В. Гордиться славой своих предков. Великая Отечественная война в памяти народа: социологические тренды / И. В. Котляров // Беларуская думка. – 2014. – № 8. – С. 88–91.
20. Оруэлл, Дж. 1984 / Оруэлл, Дж. – М.: АСТ, 2015. – 320 с.

References

1. Lotman Yu. M. *The Semiosphere. Culture and Explosion. Inside the thinking worlds. On the semiotic mechanism of culture*. Saint Petersburg, Iskusstvo-SPB Publ., 2000. 485 p. (in Russian).
2. Eco U. *The missing structure. Introduction to Semiology*. Saint Petersburg, Symposium Publ., 2006. 540 p. (in Russian).
3. *The meaning of the word “code”. Russian as a state language*. Available at: rus-gos.spbu.ru/index.php/words/show/7755 (accessed 15 January 2015) (in Russian).
4. Klovskiy D. D. *Theory of signal transmission*. Moscow, Svyaz' Publ., 1984. 376 p. (in Russian).
5. Kotlyarov I. V. (et al.) *Belarus on the way to the future: the sociological dimension*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2015. 499 p. (in Russian).

6. Kotlyarov I. V. Civilizational paradigm of the belarusian society: theoretical-methodological bases. *Vesci Nacyjanal'naj akademii navuk Belarusi. Seryja gumanitarnyh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, humanitarian series*, 2016, no. 4, pp. 20–32 (in Russian).
7. Kotlyarov I. V. (et al.) *Belarusian society in the context of civilizational and cultural code: the sociological dimension*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2017. 392 p. (in Russian).
8. Pizarov B. S. The role of retrospective social information in the formation of public consciousness (in the light of the notions of social memory). *Voprosy filosofii = Issues of Philosophy*, 1985, no. 8, pp. 60–69 (in Russian).
9. Petrov M. K. *Language, sign, culture*. Moscow, Editorial URSS Publ., 2004. 328 p. (in Russian).
10. Bourdieu P. *Sociology of Politics*. Moscow, Socio-Logos Publ., 1993. 403 p. (in Russian).
11. Baghdasaryan V. *The concept of civilizational genocode: civilizations as living systems*. Available at: <http://rusrand.ru/forecast/koncepciya-civilizacionnogo-genokoda-civilizacii-kak-jivye-sistemy> (accessed 15 January 2015).
12. *Culture as a business: not everyone is given, but for everyone*. Available at: <http://kob-media.ru/?p=25878> (accessed 15 January 2015) (in Russian).
13. Heidegger M. *Talking on a country road*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1991. 192 p. (in Russian).
14. Nehru, J. *Discovery of India*. Moscow, Politizdat Publ., 1989. 460 p. (in Russian).
15. Ruzha V. A. Patriotic culture and its dimensions. *Contemporary studies of social problems*. Available at: <http://cyberleninka.ru/article/n/patrioticheskaya-kultura-i-ee-izmereniya> (accessed 15 January 2015) (in Russian).
16. Rozhdestvenskaya E. Yu., Semenova V. V. Social memory as an object of sociological study. *INTER*, 2011, vol. 1, no. 6, pp. 27–48 (in Russian).
17. Lebon G. *Psychology of the peoples and the masses*. Saint Petersburg, Maket Publ., 1995. 311 p. (in Russian).
18. Nietzsche F. *On the benefits and harms of history for life. Vol. 2*. Moscow, Mysl' Publ., 1990, pp. 158–230 (in Russian).
19. Kotlyarov I. V. Be proud of the glory of your ancestors. The Great Patriotic War in the memory of the people: sociological trends. *Belaruskaya Dumka = Belarusian Duma*, 2014, no. 8, pp. 88–91 (in Russian).
20. Orwell J. *1984*. Moscow, AST Publ., 2015. 320 p. (in Russian).

Информация об авторе

Котляров Игорь Васильевич – д-р социолог. наук, профессор, директор. Институт социологии НАН Беларуси (ул. Сурганова, д. 1, корп. 2, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: kotlarov@socio.bas-net.by.

Information about the author

Kotlyarov Igor Vasilyevich – D. Sc. (Sociology), Professor, Director. Institute of Sociology of the National Academy of Sciences of Belarus (1, build. 2, Sarganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kotlarov@socio.bas-net.by.

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

АГРАРНЫЕ НАУКИ
AGRARIAN SCIENCES

УДК 639.371.13
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-3-374-384>

Поступило в редакцию 14.04.2018
Received 14.04.2018

Я. И. Шейко, Д. А. Жмойдяк

Институт рыбного хозяйства, Минск, Республика Беларусь

**БИОХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ТЕЛА КАРПОВ-ДВУХЛЕТКОВ
РАЗЛИЧНЫХ МЕЖПОРОДНЫХ КРОССОВ**

(Представлено академиком И. П. Шейко)

Аннотация. В сообщении приведены результаты сравнения биохимического состава мышц двухлетков двухпородных кроссов с породами и линиями карпа разного происхождения и амурского сазана. Установлены сочетания, характеризующиеся повышенным уровнем содержания сухого вещества, жира, протеина по сравнению со среднепопуляционным значением, средним уровнем коллекционных белорусских линий, импортных пород и амурским сазаном, выращенным в одинаковых условиях. Средняя масса отобранных для исследования двухлетков составила 531,3 г, с колебаниями от 370,2 до 645,0 г, в основном с низкой и средней степенью изменчивости. Средний уровень содержания сухого вещества у всех опытных кроссов составил 25,85 %, максимальное значение этого показателя отмечено у сочетания немецкий × три прим (27,92 %), минимальное у немецкий × лахвинский чешуйчатый (24,08 %). Низкие значения коэффициента вариации (1,0–9,8 %) указывают на незначительную изменчивость данного показателя у различных межпородных кроссов.

Ключевые слова: карп, сазан, порода, линия, кросс, поколение, двухлетки, биохимический состав мышц

Для цитирования: Шейко, Я. И. Биохимический состав тела карпов-двухлетков различных межпородных кроссов / Я. И. Шейко, Д. А. Жмойдяк // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 3. – С. 374–384. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-3-374-384>

Yaroslav I. Sheiko, Daria A. Zhmoidyak

Fish Industry Institute, Minsk, Republic of Belarus

**BIOCHEMICAL COMPOSITIONS OF THE BODY OF TWO-YEAR CARPS
OF DIFFERENT MIXED BRED CROSSES**

(Communicated by Academician Ivan P. Sheiko)

Abstract. The article presents the results of comparison of the biochemical composition of the muscles of two-year carp of two-way crosses and the breeds and lines of different-origin carp and Amur sazan. The combinations characterized by an increased level of the dry basis content, fat and protein are established in comparison with a mean-population value, a mean level of the Belarusian collection lines, import breeds and Amur sazan bred under the same conditions. The mean mass of two-year carp selected for investigation was 531.3 g within the range from 370.2 to 645.0 g mainly with a low and mean degree of variation. The mean level of the dry basis content of all examined crosses was 25.85 %, the maximum value of this parameter of German × three prim was 27.92 %, and the minimum value of Germany × Lahvin scaleless was 24.08 %. The low values of the variation coefficient (1.0–9.8 %) point to a slight variation of this parameter of different mixed bred crosses.

Keywords: carp, sazan, breed, line, cross, generation, two-way crosses, biochemical composition of muscles

For citation: Sheiko Ya. I., Zhmoidyak D. A. Biochemical compositions of the body of two-year carps of different mixed bred crosses. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2018, vol. 62, no. 3, pp. 374–384 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-3-374-384>

Введение. Рыба является незаменимым высококачественным продуктом питания. Низкий уровень потребления рыбы обуславливает нарушение пищевого рациона населения, так как эта продукция является источником не только полноценного белка, но и многих необходимых для организма человека соединений, в том числе полиненасыщенных жирных кислот (линолевой,

линоленовой, арахидоновой, эйкозапентаеновой и докозагексаеновой), витаминов (ретинола, эргокальциферола и токоферола), комплекса минеральных, биологически активных и других веществ. Снижение потребления рыбы и морепродуктов обуславливает несбалансированность структуры фактического питания, что вызывает нарушение физического развития, напряженность обменных процессов и адаптационных механизмов, увеличение уровня заболеваемости населения [1–5].

Рыбная продукция должна занимать одно из ведущих мест в питании человека, поэтому обеспечение населения качественными продуктами из рыбы и беспозвоночных разного ассортимента в количестве, соответствующем биологической норме потребления 18 кг в год на одного человека, является стратегической задачей [6–10].

Традиционным объектом культуры прудового рыбоводства в Республике Беларусь служит карп (*Cyprinus carpio* L.). Происхождение карпов, разводимых в республике, различно. В рыбоводстве, как и в других отраслях сельского хозяйства, находит все более широкое применение явление гетерозиса, благодаря которому происходит значительное увеличение выхода конечного продукта без вложения дополнительных затрат [11]. В ряде работ детально рассматриваются физиолого-биохимические особенности карпа на этапе товарного выращивания [12–14]. Например, у гибрида при выращивании на естественной кормовой базе отмечается более высокий уровень содержания белков и липидов [5; 15]. Более сходен с ним по этим показателям сазан, также отличающийся от карпов высоким содержанием белков и липидов. Подбор компонентов скрещиваний дает возможность получать гибридов с заданными свойствами.

Материалы и методы исследований. Формирование коллекционного генофонда пород карпа белорусской и зарубежной селекции проводится на базе селекционно-племенного участка «Изобелино» Молодечненского района Минской области.

В настоящее время в Республике Беларусь выведено три собственные породы карпа, включающие 8 различных линий. Кроме того, имеется коллекционный генофонд, где в небольших количествах представлены импортные породы карпа европейской селекции: югославский, немецкий, сарбоянский, фресинет, которые были завезены в виде трехсуточных заводских личинок из сопредельных республик, а также амурский сазан ханкайской популяции [16]. Имеющийся генофонд позволяет проводить исследования проявления эффекта гетерозиса у двухпородных кроссов по различным показателям, в том числе определяющим пищевую ценность товарной рыбы [17].

Объектами исследований являлись двухлетки двухпородных кроссов, а также чистопородных форм (импортных пород карпа пятого поколения, линий белорусской селекции восьмого–десятого поколений, входящих в коллекционное стадо, и восьмого поколения амурского сазана ханкайской популяции, выращенных в условиях Беларуси).

Двухлетков каждого происхождения после серийного механического мечения выращивали совместно. Для исследования биохимического состава мышц двухлетков разной породной принадлежности были отобраны по 5 экземпляров модального по массе тела класса. Анализы каждого показателя проводили в трехкратной повторности. Химический состав соматических мышц определяли по общепринятой методике А. П. Иванова: содержание сухого вещества – методом высушивания до постоянного веса при температуре 100–105 °С, содержание золы – путем сжигания в муфельной печи, жир – по способу Рушковского в аппарате Сокслета [18]. Статистические показатели рассчитывали по общепринятым методикам. Достоверность различий определяли с помощью нормированного отклонения (t) [19; 20].

Каждый из исследованных рыбохозяйственных и физиолого-биохимических показателей выращенных семей ранжировали по их величине. Семье с более высоким значением того или иного признака присваивали первый ранг и так далее по убывающей. Затем подсчитывали сумму рангов и делили ее на произведение количества оцениваемых признаков с количеством семей, таким образом, определяли средний ранг каждой семьи. Лучшие семьи характеризовались меньшими средними рангами, что свидетельствует о меньшем разбросе исследуемых признаков и лучшем их закреплении [21].

Результаты и их обсуждение. Химический состав мышц двухлетков двухпородных кроссов, полученных от скрещивания производителей четвертого поколения коллекционных им-

Таблица 1. Биохимический состав тела двухлеток межпородных кроссов (%)
 Table 1. Biochemical composition of the body of two-year carp of mixed bred crosses (%)

Породная принадлежность Breed	Масса, г Mass, g		Сухое вещество Dry basis		Влага Moisture		Жир Fat		Протеин Protein		Зола Ash	
	$\bar{x} \pm S\bar{x}$	Cv	$\bar{x} \pm S\bar{x}$	Cv	$\bar{x} \pm S\bar{x}$	Cv	$\bar{x} \pm S\bar{x}$	Cv	$\bar{x} \pm S\bar{x}$	Cv	$\bar{x} \pm S\bar{x}$	Cv
Три прим × югославский	474,0 ± 3,45	2,3	24,94 ± 1,09	9,8	75,06 ± 1,07	3,2	4,08 ± 0,34	18,9	19,87 ± 1,00	11,2	1,00 ± 0,11	25,5
Тремлянский чешуйчатый × югославский	490,0 ± 7,28	4,7	25,54 ± 0,99	8,7	74,45 ± 0,76	2,3	5,87 ± 0,46	17,5	18,70 ± 0,63	7,5	0,97 ± 0,09	20,7
\bar{x} (югославский самцы)	482,0 ± 3,77	3,5	25,24 ± 0,73	9,2	74,75 ± 0,64	2,7	4,97 ± 0,29	18,2	19,28 ± 0,57	9,3	0,98 ± 0,07	23,1
Югославский × три прим	527,5 ± 9,17	5,5	25,74 ± 0,32	2,8	74,08 ± 0,53	1,6	6,84 ± 0,59	19,2	17,96 ± 0,32	4,0	0,98 ± 0,07	16,8
Югославский × лахвинский чешуйчатый	515,2 ± 7,33	4,5	26,15 ± 0,37	3,2	73,85 ± 0,36	1,1	7,67 ± 0,67	19,6	17,53 ± 0,30	3,8	0,95 ± 0,07	16,0
\bar{x} (югославский самки)	521,3 ± 5,83	5,0	25,94 ± 0,25	3,0	73,96 ± 0,30	1,3	7,25 ± 0,45	19,4	17,74 ± 0,22	3,9	0,96 ± 0,05	16,4
Тремлянский чешуйчатый × фресинет	488,0 ± 8,80	5,7	26,13 ± 0,21	1,8	73,87 ± 2,93	8,4	7,66 ± 0,67	19,7	17,58 ± 0,46	5,9	0,89 ± 0,08	21,0
Лохвинский чешуйчатый × фресинет	557,0 ± 38,00	21,5	24,93 ± 0,28	2,5	75,07 ± 0,27	0,8	7,00 ± 0,90	28,9	17,93 ± 0,68	8,5	0,83 ± 0,10	28,1
Три прим × фресинет	430,7 ± 14,16	10,4	26,52 ± 0,13	1,1	73,48 ± 1,97	6,0	8,32 ± 0,39	10,6	17,24 ± 0,25	3,3	0,96 ± 0,06	14,0
\bar{x} (фресинет самцы)	491,9 ± 11,23	12,5	25,86 ± 0,12	1,8	74,14 ± 0,97	5,1	7,66 ± 0,39	19,7	17,58 ± 0,27	5,9	0,89 ± 0,05	21,0
Фресинет × три прим	561,0 ± 18,63	10,5	25,42 ± 0,81	7,1	74,58 ± 0,80	2,4	8,08 ± 0,52	14,4	16,10 ± 0,81	11,3	1,22 ± 0,01	2,4
Фресинет × лахвинский чешуйчатый	645,0 ± 26,10	12,8	26,53 ± 0,21	1,8	73,53 ± 0,20	0,6	7,79 ± 0,55	15,8	16,94 ± 0,59	7,8	1,74 ± 0,14	17,8
Фресинет × тремлянский зеркальный	638,3 ± 38,35	19,0	25,92 ± 0,64	5,5	74,08 ± 0,63	1,9	6,93 ± 1,02	33,1	17,73 ± 0,75	9,5	1,22 ± 0,05	9,6
\bar{x} (фресинет самки)	614,8 ± 15,83	14,1	25,96 ± 0,32	4,8	74,06 ± 0,31	1,6	7,60 ± 0,41	21,1	16,92 ± 0,42	9,5	1,39 ± 0,04	9,9
Немецкий × лахвинский чешуйчатый	370,2 ± 12,41	10,6	24,08 ± 0,21	2,0	75,92 ± 0,20	0,6	5,07 ± 0,37	16,3	18,33 ± 0,33	4,0	0,73 ± 0,05	14,1
Немецкий × три прим	567,0 ± 19,72	11,0	27,92 ± 0,12	1,0	76,08 ± 0,14	0,4	7,28 ± 0,41	12,6	19,74 ± 0,41	4,6	0,87 ± 0,05	11,9
Немецкий × тремлянский зеркальный	522,6 ± 50,73	30,7	26,53 ± 0,47	4,0	73,47 ± 0,49	1,5	7,73 ± 0,57	16,4	18,07 ± 0,30	3,7	0,71 ± 0,06	20,5
\bar{x} (немецкий самки)	486,6 ± 15,46	17,4	26,18 ± 0,16	2,3	75,16 ± 0,15	0,8	6,70 ± 0,26	15,1	18,71 ± 0,20	4,1	0,77 ± 0,03	15,5
Смесь зеркальная (изобелинский) × баттерфляй (молоки из России)	591,2 ± 21,12	11,3	25,52 ± 0,30	2,6	74,41 ± 0,30	0,9	5,90 ± 0,33	12,7	18,59 ± 0,34	4,1	1,05 ± 0,10	21,5
\bar{x} все кроссы	531,3 ± 4,76	10,6	29,67 ± 0,14	3,9	75,06 ± 0,23	2,6	6,68 ± 0,14	17,7	18,14 ± 0,13	6,1	1,01 ± 0,02	17,9

портных пород с породами и линиями белорусской селекции, представлен в табл. 1. Средняя масса отобранных для исследования двухлетков составила 531,3 г, с колебаниями от 370,2 до 645,0 г, в основном с низкой и средней степенью изменчивости. Средний уровень содержания сухого вещества у всех опытных кроссов составил 25,85 %, максимальное значение этого показателя отмечено у сочетания немецкий × три прим (27,92 %), минимальное у немецкий × лахвинский чешуйчатый (24,08 %). Низкие значения коэффициента вариации (1,0–9,8 %) указывают на незначительную изменчивость данного показателя у различных межпородных кроссов. Вероятно, это обусловило незначительные в основном статистически не достоверные различия между уровнем содержания сухого вещества у отдельных кроссов по сравнению со средним популяционным значением данного показателя (табл. 2).

Т а б л и ц а 2. Сравнительная оценка двухпородных кроссов карпа по содержанию сухого вещества в мышцах двухлетков

Table 2. Comparative assessment of two-way crosses of carp through the dry basis content in the two-year carp muscles

Кросс Cross	Достоверность различий Reliability of differences							
	от среднего значения кроссов from a mean value of crosses		от пород карпа белорусской селекции from Belarusian selection carp breeds		от импортных пород from imports breeds		от сазана from sazan	
	<i>t</i>	<i>p</i>	<i>t</i>	<i>p</i>	<i>t</i>	<i>p</i>	<i>t</i>	<i>p</i>
Три прим × югославский	0,83	>0,1	2,98	<0,05	0,57	>0,1	6,30	<0,01
Тремлянский чешуйчатый × югославский	0,04	>0,1	2,67	<0,05	0,04	>0,1	6,24	<0,01
\bar{x}	0,82	>0,1	3,86	<0,02	0,43	>0,1	7,83	<0,001
Югославский × три прим	0,32	>0,1	5,63	<0,01	0,38	>0,1	9,78	<0,001
Югославский × лахвинский чешуйчатый	0,77	>0,1	4,40	<0,01	1,23	>0,1	8,95	<0,001
\bar{x}	1,44	>0,1	5,77	<0,01	0,96	>0,1	9,87	<0,001
Тремлянский чешуйчатый × фресинет	1,16	>0,1	5,63	<0,01	1,57	>0,1	9,79	<0,001
Ляхвинский чешуйчатый × фресинет	3,02	<0,05	7,97	<0,001	0,70	>0,1	11,12	<0,001
Три прим × фресинет	3,78	<0,02	5,10	<0,01	3,04	<0,05	9,50	<0,001
\bar{x}	0,06	>0,1	7,04	<0,001	0,92	>0,1	10,50	<0,001
Фресинет × три прим	0,52	>0,1	3,33	<0,05	0,19	>0,1	7,21	<0,001
Фресинет × лахвинский чешуйчатый	2,81	<0,05	4,60	<0,01	2,71	<0,05	9,21	<0,001
Фресинет × тремлянский зеркальный	0,11	>,1	3,35	≈0,02	0,49	>0,1	7,64	<0,001
\bar{x}	0,32	>0,1	5,15	<0,01	0,89	>0,1	9,48	<0,001
Немецкий × лахвинский чешуйчатый	7,31	<0,001	10,86	<0,001	4,28	<0,01	12,70	<0,001
Немецкий × три прим	12,20	<0,001	1,17	>0,1	7,68	<0,001	7,46	<0,001
Немецкий × тремлянский зеркальный	0,19	>0,1	3,13	<0,05	1,74	>0,1	7,90	<0,001
\bar{x}	1,64	>0,1	5,86	<0,01	1,86	>0,1	9,90	<0,001
Смесь зеркальная (изобелинский) × баттерфляй (молоки из России)	1,02	>0,1	6,30	<0,01	-0,15	>0,1	10,19	<0,001

Статистически достоверные отличия в сторону увеличения содержания сухого вещества наблюдаются у кроссов три прим × фресинет, фресинет × лахвинский чешуйчатый, немецкий × три прим, а в сторону уменьшения у кроссов лахвинский чешуйчатый × фресинет, немецкий × лахвинский чешуйчатый. У всех рассмотренных комбинаций скрещиваний содержание сухого вещества в мышцах двухлетков ниже, чем в среднем у белорусских линий, выращенных одновременно с опытными кроссами. Установленные различия статистически достоверны, за исключением сочетания немецкий × три прим.

Средние показатели содержания сухого вещества у кроссов и импортных пород различаются незначительно (25,85 и 25,58 %). Поэтому отличия отдельных кроссов по содержанию сухого вещества от среднего уровня импортных коллекционных пород в основном статистически не достоверны. Лишь у сочетаний три прим × фресинет и немецкий × три прим установлены статистически значимые отличия в сторону увеличения, а у фресинет × лахвинский чешуйчатый

и немецкий × лахвинский чешуйчатый в сторону уменьшения. Статистически достоверная разница по содержанию сухого вещества установлена между кроссами карпа и амурским сазаном, у которого наблюдаются значительные преимущества по сравнению с помесными карпами.

Содержание влаги в мышцах двухлетков обратно пропорционально содержанию сухого вещества. Поэтому при сравнении уровня содержания влаги у кроссов со средним популяционным показателем и средними показателями чистопородных групп получены сходные результаты (табл. 3). Статистически достоверные отклонения содержания влаги от средней популяционной величины и среднего уровня данного показателя у импортных коллекционных пород установлены только для комбинаций скрещивания фресинет × лахвинский чешуйчатый (в сторону уменьшения), а также немецкий × лахвинский чешуйчатый и немецкий × три прим (в сторону увеличения). У всех кроссов содержание влаги выше, чем у белорусских пород. Установленные различия статистически достоверны за исключением кроссов тремлянский чешуйчатый × фресинет, три прим × фресинет. Содержание влаги в мышцах двухлетков двухпородных кроссов карпа выше, чем у амурского сазана. Для всех вариантов сравнения разница статистически достоверна, за исключением комбинации тремлянский чешуйчатый × фресинет.

Т а б л и ц а 3. Сравнительная оценка двухпородных кроссов карпа по содержанию влаги в мышцах двухлетков

Table 3. Comparative assessment of two-way crosses of carp through the moisture content in the two-year carp muscles

Кросс Cross	Достоверность различий Reliability of differences							
	от среднего значения кроссов from a mean value of crosses		от пород карпа белорусской селекции from Belarusian selection carp breeds		от импортных пород from imports breeds		от сазана from sazan	
	<i>t</i>	<i>p</i>	<i>t</i>	<i>p</i>	<i>t</i>	<i>p</i>	<i>t</i>	<i>p</i>
Три прим × югославский	0,58	>0,1	3,11	<0,05	0,58	>0,1	6,30	<0,01
Тремлянский чешуйчатый × югославский	0,05	>0,1	3,54	<0,02	0,04	>0,1	7,22	<0,001
\bar{x}	0,49	>0,1	4,59	<0,01	0,48	>0,1	8,19	<0,001
Югославский × три прим	0,60	>0,1	4,25	<0,01	0,57	>0,1	8,09	<0,001
Югославский × лахвинский чешуйчатый	1,38	>0,1	5,29	<0,01	1,27	>0,1	8,75	<0,001
\bar{x}	1,28	>0,1	6,35	<0,01	1,14	>0,1	9,20	<0,001
Тремлянский чешуйчатый × фресинет	0,18	>0,1	1,28	>0,1	0,55	>0,1	2,27	<0,1
Ляхвинский чешуйчатый × фресинет	1,93	>0,1	7,97	<0,001	1,70	>0,1	10,85	<0,001
Три прим × фресинет	0,47	>0,1	0,91	>0,1	0,47	>0,1	3,08	<0,05
\bar{x}	0,38	>0,1	2,41	<0,1	0,28	>0,1	5,96	<0,01
Фресинет × три прим	0,19	>0,1	3,53	<0,02	0,19	>0,1	7,14	<0,001
Фресинет × лахвинский чешуйчатый	3,92	<0,02	6,58	<0,01	2,65	<0,05	9,03	<0,001
Фресинет × тремлянский зеркальный	0,51	>0,1	3,65	<0,02	0,50	>0,1	7,53	<0,001
\bar{x}	0,98	>0,1	6,48	<0,01	0,87	>0,1	9,28	<0,001
Немецкий × лахвинский чешуйчатый	3,86	<0,02	15,03	<0,001	4,46	<0,01	12,36	<0,001
Немецкий × три прим	6,84	<0,01	18,06	<0,001	5,46	<0,01	12,84	<0,001
Немецкий × тремлянский зеркальный	1,60	>0,1	3,52	<0,02	1,75	>0,1	7,70	<0,001
\bar{x}	2,96	<0,02	13,96	<0,001	2,39	<0,1	11,50	<0,001
Смесь зеркальная (изобелинский) × баттерфляй (молоки из России)	0,35	>0,1	7,60	<0,001	0,02	>0,1	9,79	<0,001

Содержание жира в мышцах двухлетков помесного происхождения составило в среднем 6,68 %, с колебаниями от 4,08 % (три прим × югославский) до 8,32 % (три прим × фресинет). Содержание жира в мышцах двухлетков относится к признакам с сильной степенью изменчивости с коэффициентами вариации 12,6–33,1 %. Статистически значимые отклонения этого признака от средней популяционной величины достоверны у реципрокных комбинаций между

отводкой изобелинского карпа три прим и карпом породы фресинет (в сторону увеличения), а у сочетаний три прим × югославский и немецкий × лахвинский чешуйчатый (в сторону уменьшения) (табл. 4). У изученных кроссов проявляется тенденция к уменьшению содержания жира в мышцах двухлетков по сравнению с чистопородными карпами и амурским сазаном. Однако в вариантах сравнения кроссов со средними значениями карпа белорусской селекции и импортными породами статистически значимые различия установлены лишь для отдельных комбинаций (три прим × югославский, тремлянский чешуйчатый × югославский, немецкий × лахвинский чешуйчатый, смесь зеркальная × баттерфляй). У двухлетков всех кроссов содержание жира ниже, чем средний уровень этого показателя у амурского сазана. Установленные различия статистически достоверны.

Т а б л и ц а 4. Сравнительная оценка двухпородных кроссов карпа по содержанию жира в мышцах двухлетков

Table 4. Comparative assessment of two-way crosses of carp through the fat content in the two-year carp muscles

Кросс Cross	Достоверность различий Reliability of differences							
	от среднего значения кроссов from a mean value of crosses		от пород карпа белорусской селекции from Belarusian selection carp breeds		от импортных пород from imports breeds		от сазана from sazan	
	<i>t</i>	<i>p</i>	<i>t</i>	<i>p</i>	<i>t</i>	<i>p</i>	<i>t</i>	<i>p</i>
Три прим × югославский	7,07	<0,001	9,76	<0,001	7,01	<0,001	13,60	<0,001
Тремлянский чешуйчатый × югославский	1,68	>0,1	4,66	<0,01	2,70	<0,05	7,46	<0,001
\bar{x}	5,31	<0,01	8,46	<0,001	5,53	<0,01	12,67	<0,001
Югославский × три прим	0,26	>0,1	2,36	<0,1	0,83	>0,1	4,55	<0,01
Югославский × лахвинский чешуйчатый	1,45	>0,1	0,98	>0,1	0,36	>0,1	2,91	<0,05
\bar{x}	1,21	>0,1	2,13	<0,1	0,27	>0,1	4,88	<0,01
Тремлянский чешуйчатый × фресинет	1,43	>0,1	0,99	>0,1	0,35	>0,1	2,92	<0,05
Ляхвинский чешуйчатый × фресинет	0,35	>0,1	1,46	>0,1	0,42	>0,1	2,94	<0,05
Три прим × фресинет	3,96	<0,02	0,12	>0,1	1,80	>0,1	3,10	<0,05
\bar{x}	2,36	<0,1	1,50	>0,1	0,51	>0,1	4,54	<0,01
Фресинет × три прим	2,60	≈0,05	0,51	>0,1	1,10	>0,1	2,90	<0,05
Фресинет × лахвинский чешуйчатый	1,95	>0,1	0,96	>0,1	0,61	>0,1	3,25	<0,05
Фресинет × тремлянский зеркальный	0,24	>0,1	1,37	>0,1	0,44	>0,1	2,68	<0,05
\bar{x}	2,12	<0,1	1,57	>0,1	0,38	>0,1	4,50	<0,01
Немецкий × лахвинский чешуйчатый	4,07	<0,01	7,13	<0,001	4,70	<0,01	0,59	<0,001
Немецкий × три прим	1,38	>0,1	2,21	<0,1	0,23	>0,1	5,18	<0,01
Немецкий × тремлянский зеркальный	1,79	>0,1	1,02	>0,1	0,50	>0,1	3,25	<0,01
\bar{x}	0,07	>0,1	4,40	<0,01	1,67	>0,1	8,59	<0,001
Смесь зеркальная (изобелинский) × баттерфляй (молоки из России)	2,17	<0,1	5,73	<0,01	3,21	<0,02	9,41	<0,001

У двухпородных кроссов содержание протеина в мышцах двухлетков составило в среднем 18,14 %, с колебаниями от 16,10 до 19,87 %. Повышенным содержанием протеина характеризовались кроссы, у которых отцовским компонентом скрещиваний являлся югославский карп, а пониженным – кроссы, полученные от самок породы фресинет. Данный показатель в основном относится к признакам с низким коэффициентом вариации, величина которого в основном составляет 6,1 %. Статистически значимые отклонения от средней популяционной величины установлены для реципрокных сочетаний отводки изобелинского карпа три прим и породы фресинет (в сторону уменьшения), а также для комбинации немецкий × три прим (в сторону увеличения) (табл. 5). У всех изученных кроссов содержание протеина оказалось ниже, чем в среднем у карпа белорусской селекции. Статистически значимые отклонения установлены у семи комбинаций скрещиваний. Четыре кросса статистически достоверно характеризовались повышенным содер-

жанием протеина по сравнению со средним уровнем данного показателя у импортных пород. У всех опытных сочетаний уровень протеина оказался ниже, чем среднее значение этого показателя у амурского сазана. Установленные различия статистически достоверны за исключением кросса три прим × югославский.

Т а б л и ц а 5. Сравнительная оценка различий двухпородных кроссов карпа по содержанию протеина в мышцах двухлетков

T a b l e 5. Comparative assessment of the differences of two-way crosses of carp through the protein content in the two-year carp muscles

Кросс Cross	Достоверность различий Reliability of differences							
	от среднего значения кроссов from a mean value of crosses		от пород карпа белорусской селекции from Belarusian selection carp breeds		от импортных пород from imports breeds		от сазана from sazan	
	<i>t</i>	<i>p</i>	<i>t</i>	<i>p</i>	<i>t</i>	<i>p</i>	<i>t</i>	<i>p</i>
Три прим × югославский	1,72	>0,1	0,59	>0,1	2,61	<0,05	1,97	>0,1
Тремлянский чешуйчатый × югославский	0,87	>0,1	0,83	>0,1	2,26	<0,1	4,01	≈0,001
\bar{x}	1,95	>0,1	0,03	>0,1	3,42	<0,02	3,52	<0,02
Югославский × три прим	0,52	>0,1	3,25	<0,05	1,98	>0,1	6,26	<0,01
Югославский × лахвинский чешуйчатый	1,86	>0,1	4,50	<0,01	0,90	>0,1	7,00	<0,001
\bar{x}	1,56	>0,1	4,67	<0,01	1,77	>0,1	7,02	<0,001
Тремлянский чешуйчатый × фресинет	1,17	>0,1	3,24	<0,05	0,75	>0,1	6,12	<0,01
Ляхвинский чешуйчатый × фресинет	0,30	>0,1	1,84	>0,1	1,02	>0,1	4,70	<0,01
Три прим × фресинет	3,19	<0,05	5,83	<0,01	0,12	>0,1	7,68	<0,001
\bar{x}	1,87	>0,1	4,65	<0,01	1,11	>0,1	7,06	<0,001
Фресинет × три прим	2,49	<0,05	3,74	<0,02	1,31	>0,1	6,05	<0,01
Фресинет × лахвинский чешуйчатый	1,98	>0,1	3,64	<0,02	0,41	>0,1	6,26	<0,01
Фресинет × тремлянский зеркальный	0,54	>0,1	1,94	>0,1	0,68	>0,1	4,64	<0,01
\bar{x}	2,77	<0,05	4,84	<0,01	0,59	>0,1	7,23	<0,01
Немецкий × лахвинский чешуйчатый	0,53	>0,1	2,28	<0,1	2,89	<0,05	5,66	>0,001
Немецкий × три прим	3,72	<0,02	1,01	>0,1	5,51	<0,01	3,37	=0,02
Немецкий × тремлянский зеркальный	0,21	>0,1	3,10	<0,05	2,37	<0,1	6,18	<0,01
\bar{x}	2,39	<0,05	1,76	>0,1	5,21	<0,01	5,54	<0,01
Смесь зеркальная (изобелинский) × баттерфляй (молоки из России)	1,24	>0,1	1,61	>0,1	3,48	<0,02	5,24	<0,01

Содержание минеральных веществ (зола) у кроссов составляет в среднем 1,01 %. Максимальный уровень данного показателя отмечен у комбинации фресинет × лахвинский чешуйчатый (1,74 %), минимальный у сочетания немецкий × тремлянский зеркальный (0,71 %). Данный показатель характеризуется в основном высокими коэффициентами вариации. При сравнении содержания минеральных веществ в мышцах двухлетков кроссов со средним популяционным уровнем и средними показателями чистопородных групп установлено преимущество группы, полученной от скрещивания самок карпа породы фресинет с линиями белорусской селекции, причем во всех вариантах сравнения установлены статистически значимые преимущества (табл. 6).

Двухлетки из группы кроссов, полученных от самок немецкого карпа, наоборот характеризовались пониженным содержанием минеральных веществ по сравнению со средним популяционным уровнем, средними показателями импортных пород и амурским сазаном. Статистически значимые отклонения содержания минеральных веществ в сторону увеличения установлены у кроссов, полученных от самок югославского карпа, комбинаций три прим × фресинет, смесь зеркальная × баттерфляй, при сравнении их со средним уровнем данного показателя у двухлетков белорусских линий.

Т а б л и ц а 6. Сравнительная оценка статистической достоверности различий двухпородных кроссов карпа по содержанию золы в мышцах двухлетков

Table 6. Comparative assessment of the static reliability of the differences of two-way crosses of carp through the ash content in the two-year carp muscles

Кросс Cross	Достоверность различий Reliability of differences							
	от среднего значения кроссов from a mean value of crosses		от пород карпа белорусской селекции from Belarusian selection carp breeds		от импортных пород from imports breeds		от сазана from sazan	
	<i>t</i>	<i>p</i>	<i>t</i>	<i>p</i>	<i>t</i>	<i>p</i>	<i>t</i>	<i>p</i>
Три прим × югославский	0,09	>0,1	2,31	<0,1	0,00	>0,1	0,51	>0,1
Тремлянский чешуйчатый × югославский	0,43	>0,1	2,40	<0,1	0,30	>0,1	0,91	>0,1
\bar{x}	0,41	>0,1	2,93	<0,05	0,25	>0,1	0,99	>0,1
Югославский × три прим	0,41	>0,1	2,93	<0,05	0,25	>0,1	0,99	>0,1
Югославский × лахвинский чешуйчатый	0,82	>0,1	2,60	≈0,05	0,62	>0,1	1,36	>0,1
\bar{x}	0,93	>0,1	3,20	>0,02	0,62	>0,1	1,56	>0,1
Тремлянский чешуйчатый × фресинет	1,45	>0,1	1,80	>0,1	1,23	>0,1	1,90	>0,1
Ляхвинский чешуйчатый × фресинет	1,70	>0,1	1,03	>0,1	1,58	>0,1	2,13	>0,1
Три прим × фресинет	0,79	>0,1	2,95	<0,05	0,55	>0,1	1,39	>0,1
\bar{x}	2,23	<0,1	2,30	<0,1	1,72	>0,1	2,65	<0,05
Фресинет × три прим	9,39	<0,001	8,38	<0,001	5,33	<0,01	3,88	<0,02
Фресинет × лахвинский чешуйчатый	5,16	<0,01	6,76	<0,01	5,08	<0,01	4,67	<0,01
Фресинет × тремлянский зеркальный	3,90	<0,02	6,53	<0,01	3,43	<0,02	2,50	<0,05
\bar{x}	8,50	<0,001	9,43	<0,001	6,89	≈0,001	5,83	<0,01
Немецкий × лахвинский чешуйчатый	5,20	<0,01	0,26	>0,1	4,22	<0,01	5,15	<0,01
Немецкий × три прим	2,60	<0,05	2,05	≈0,1	2,03	≈0,1	2,97	<0,05
Немецкий × тремлянский зеркальный	4,74	<0,01	0,00	>0,1	4,02	≈0,01	4,85	<0,01
\bar{x}	6,65	<0,01	0,89	>0,1	4,60	<0,01	5,80	<0,01
Смесь зеркальная (изобелинский) × баттерфляй (молоки из России)	0,39	>0,1	2,91	<0,05	0,46	>0,1	0,09	>0,1

Т а б л и ц а 7. Комплексная оценка биохимического состава мышц двухлетков межпородных кроссов

Table 7. Complex assessment of the biochemical composition of the muscles of two-year carp of mixed bred crosses

Кросс Cross	Ранги по показателям Rank by rank					Сумма рангов Amount of ranks	Средний ранг Average rank
	сухое вещество dry basis	влага moisture	жир fat	протеин protein	зола ash		
Три прим × югославский	11	10	14	1	4	40	0,57
Тремлянский чешуйчатый × югославский	8	8	12	3	6	37	0,53
Югославский × три прим	7	6	10	7	5	35	0,50
Югославский × лахвинский чешуйчатый	4	5	5	11	8	33	0,47
Тремлянский чешуйчатый × фресинет	5	4	6	10	9	34	0,48
Ляхвинский чешуйчатый × фресинет	12	11	8	8	11	50	0,71
Три прим × фресинет	3	1	1	12	3	24	0,34
Фресинет × три прим	10	9	2	14	2	37	0,53
Фресинет × лахвинский чешуйчатый	2	3	3	13	1	22	0,31
Фресинет × тремлянский зеркальный	6	5	9	9	2	31	0,44
Немецкий × лахвинский чешуйчатый	13	12	13	5	12	55	0,79
Немецкий × три прим	1	13	7	2	10	33	0,47
Немецкий × тремлянский зеркальный	2	2	4	6	13	27	0,39
Смесь зеркальная (изобелинский) × баттерфляй (молоки из России)	9	7	11	4	3	34	0,48

С целью определения относительной ценности кроссов по биохимическому составу мышц двухлетков проведено их ранжирование (табл. 7).

Судя по результатам ранжирования относительно большей ценностью с точки зрения биохимического состава мышц двухлетков обладают кроссы три прим × фресинет, фресинет × лахвинский чешуйчатый со средними рангами 0,34 и 0,31 соответственно. Менее ценны кроссы лахвинский чешуйчатый × фресинет и немецкий × лахвинский чешуйчатый со средними рангами 0,71 и 0,79 соответственно.

Выводы

1. Средний уровень содержания сухого вещества в мышцах двухлетков опытных кроссов составил 25,85 %, максимальное значение этого показателя отмечено у сочетания немецкий × три прим (27,92 %), минимальное – у немецкий × лахвинский чешуйчатый (24,08 %). Статистически достоверные отличия в сторону увеличения содержания сухого вещества наблюдаются у кроссов три прим × фресинет, фресинет × лахвинский чешуйчатый, немецкий × три прим, а в сторону уменьшения у кроссов лахвинский чешуйчатый × фресинет, немецкий × лахвинский чешуйчатый. Средние показатели содержания сухого вещества у кроссов и импортных пород различаются незначительно (25,85 и 25,58 %). Лишь у сочетаний три прим × фресинет и немецкий × три прим установлены статистически значимые отличия в сторону увеличения, а у кроссов фресинет × лахвинский чешуйчатый и немецкий × лахвинский чешуйчатый в сторону уменьшения данного показателя.

2. Содержание жира в мышцах двухлетков помесного происхождения составило в среднем 6,68 %, с колебаниями от 4,08 % (три прим × югославский) до 8,32 % (три прим × фресинет). Статистически значимые отклонения этого признака в сторону увеличения от средней популяционной величины установлены у реципрокных комбинаций между отводкой изобелинского карпа три прим и карпом породы фресинет. У изученных кроссов проявляется тенденция к уменьшению содержания жира в мышцах двухлетков по сравнению с чистопородными карпами и амурским сазаном. У двухлетков всех кроссов содержание жира ниже, чем средний уровень этого показателя у амурского сазана. Установленные различия статистически достоверны.

3. У двухпородных кроссов содержание протеина в мышцах двухлетков составило в среднем 18,14 %, с колебаниями от 16,10 до 19,87 %. Повышенным содержанием протеина характеризовались кроссы, у которых отцовским компонентом скрещиваний являлся югославский карп, а пониженным, кроссы, полученные от самок породы фресинет. Статистически значимые отклонения от средней популяционной величины в сторону увеличения установлены для комбинации немецкий × три прим. У изученных кроссов проявляется тенденция к снижению содержания протеина по сравнению со средним уровнем данного показателя у карпа белорусской селекции и повышенным содержанием по сравнению с импортными породами. У всех опытных сочетаний уровень протеина оказался ниже, чем среднее значение этого показателя у амурского сазана.

4. Содержание минеральных веществ (золы) у кроссов составляет в среднем 1,01 %. Максимальный уровень данного показателя отмечен у комбинации фресинет × лахвинский чешуйчатый (1,74 %), минимальный у сочетания немецкий × тремлянский зеркальный (0,71 %). При сравнении содержания минеральных веществ в мышцах двухлетков кроссов со средним популяционным уровнем и средними показателями чистопородных групп установлено преимущество комбинаций, полученных от скрещивания самок карпа породы фресинет с линиями белорусской селекции.

5. В результате комплексной оценки биохимического состава мышц двухлетков двухпородных кроссов методом ранжирования установлено, что относительно большей пищевой ценностью с точки зрения состава съедобной части тела характеризуются кроссы три прим × фресинет, фресинет × лахвинский чешуйчатый. Менее ценными оказались кроссы лахвинский чешуйчатый × фресинет и немецкий × лахвинский чешуйчатый.

Список использованных источников

1. Рыбоводно-биологическая и биохимическая характеристика сеголетков и годовиков зеркальных кроссов изобелинского карпа / Л. С. Дударенко [и др.] // *Вопр. рыбного хоз-ва Беларуси*. – Минск, 2008. – Вып. 24. – С. 77–80.
2. Исследования по биохимическим маркерам местного карпа и амурского сазана в рыбхозах Беларуси / Н. Н. Башунова [и др.] // *Биологические ресурсы водоемов бассейна Балтийского моря: тезисы докладов XXIII науч. конф. по изучению водоемов Прибалтики*. – Петрозаводск, 1991. – С. 131–139.
3. Биохимическая генетика рыб / А. С. Трошин (отв. ред.) [и др.]. – Ленинград, 1973. – 210 с.
4. Оценка реализации гетерозисного эффекта у двухлетков трехпородных кроссов / Е. В. Таразевич [и др.] // *Вопр. рыбного хоз-ва Беларуси*. – Минск, 2003. – Вып. 19. – С. 97–102.
5. Артамонова, Т. И. Количественная характеристика мышц и некоторых морфологических структур тела двухлетков карпа в условиях высокоинтенсивной технологии выращивания / Т. И. Артамонова // *Актуальные вопросы пресноводной аквакультуры*. – Москва, 2000. – Вып. 75. – С. 125–131.
6. Артамонова, Т. И. Некоторые особенности формирования морфологических структур тела двухлетков карпа в связи с ростом / Т. И. Артамонова, В. Э. Панов, В. Э. Есавкин // *Вопр. физиологии и кормления рыб*. – СПб., 1999. – Вып. 74. – С. 169–176.
7. Рыбхозная характеристика ремонта семей селекционируемых отводок карпа / Е. В. Таразевич [и др.] // *Вопр. рыбного хоз-ва Беларуси: сборник научных трудов*. – Минск, 2002. – Вып. 18. – С. 105–110.
8. Рыбоводно-биологические и биохимико-генетические особенности карпов, разводимых в Республике Беларусь / А. И. Чутаева [и др.] // *Вопр. рыбного хоз-ва Беларуси*. – Минск, 1997. – Вып. 15. – С. 11–33.
9. Воспроизводительная способность карпов белорусской селекции, импортных пород и различных кроссов / Е. В. Таразевич [и др.] // *Вопр. рыбного хоз-ва Беларуси*. – Минск, 2001. – Вып. 17. – С. 65–73.
10. Книга, М. В. Оценка проявления гетерозисного эффекта по рыбоводно-биологическим показателям у трехпородных кроссов / М. В. Книга, Е. В. Таразевич, Г. А. Прохорчик // *Вопр. рыбного хоз-ва Беларуси*. – Минск, 2004. – Вып. 20. – С. 94–103.
11. Кончиц, В. В. Современные проблемы развития аквакультуры Беларуси и пути их разрешения / В. В. Кончиц // *Аквакультура начала XXI века: истоки, состояние, стратегия развития*. – Москва, 2002. – С. 43–46.
12. Профирьев, И. А. Обмен веществ и продуктивность / И. А. Профирьев // *Сельскохозяйственная биология*. – 2001. – № 2. – С. 27–41.
13. Томиленко, В. Г. Пищевая ценность помесных и гибридных карпов / В. Г. Томиленко, А. И. Гречковская // *Рыбное хозяйство*. – 1967. – № 4. – С. 62–64.
14. Elliot, J. The Energetics of Feeding, Metabolism and Growth of Brown Trout (*Salmo trutta* L.) in Relation to Body Weight, Water Temperature and Ration Size / J. Elliot // *Journal of Animal Ecology*, – 1976. – Vol. 45, N 3. – P. 923–948. <https://doi.org/10.2307/3590>
15. Строганов, Н. С. Роль среды в пластическом обмене у рыб / Н. С. Строганов // *Обмен веществ и биохимия рыб*. – М., 1967. – С. 23–30.
16. Проблема сохранения генофонда карпов в Республике Беларусь / Е. В. Таразевич [и др.] // *Проблемы интенсификации производства продуктов животноводства*. – Жодино, 2008. – С. 118–119.
17. Сравнительная характеристика пищевой ценности групп кроссов с тремлянским карпом / Е. В. Таразевич [и др.] // *Состояние и перспективы развития пресноводной аквакультуры*. – Москва: ВНИИР, 2013. – С. 473–477.
18. Иванов, А. П. Химический анализ рыб и кормов / А. П. Иванов. – М.: Рыбное хозяйство, 1963. – 36 с.
19. Рокицкий, П. Ф. Биологическая статистика / П. Ф. Рокицкий. – Минск: Вышэйшая школа, 1973. – С. 24–53.
20. Слуцкий, Е. С. Фенотипическая изменчивость рыб (селекционный аспект) / Е. С. Слуцкий // *Известия государственного научно-исследовательского института озерного и речного рыбного хозяйства*. – 1978. – Т. 134. – С. 3–132.
21. К методике определения рыбохозяйственной ценности отдельных групп рыб методом ранжирования / Е. В. Таразевич [и др.] // *Вопр. рыбного хоз-ва Беларуси*. – Минск, 2005. – Вып. 21. – С. 45–55.

References

1. Dudarenko L. S., Tarazevich E. V., Kniga M. V., Us A. P., Alekseeva A. A. Fish-breeding and biological and biological characteristics of current-year fish and one-year mirror isobelin carp crosses. *Voprosy rybnogo khozyaistva Belarusi = Belarus Fish Industry Problems*. Minsk, 2008, vol. 24, pp. 77–80 (in Russian).
2. Bashunova N. N., Truveller K. A., Semenov A. P., Baev A. N. Biochemical marker studies of local carp and Amur sazan in fish farms of Belarus. *Biologicheskie resursy vodoemov basseina Baltiiskogo morya: tezisy dokladov XXIII nauchnoi konferentsii po izucheniyu vodoemov Pribaltiki [Biological resources of water reservoirs of the Baltic sea basin: Book of Abstracts of the papers of the XXIII Scientific Conference on Water Reservoirs of Baltic States]*. Petrozavodsk, 1991, pp. 131–139 (in Russian).
3. Troshin A. S. (ed.) *Biochemical genetics of fish*. Leningrad, 1973. 210 p. (in Russian).
4. Tarazevich E. V., Prokhorchik G. A., Kniga M. V., Dudarenko L. S., Us A. P., Chimbur I. V., Sazonov V. B., Trubach I. A., Vashkevich L. M. Assessment of the realization of the heterotic effect in two-year carp of three-way crosses. *Voprosy rybnogo khozyaistva Belarusi = Belarus Fish Industry Problems*. Minsk, 2003, vol. 19, pp. 97–102 (in Russian).
5. Artamonova T. I. Quantitative characteristic of muscles and some morphological structures of the body of two-year carp under the conditions of high-performance breeding technology. *Aktual'nye voprosy presnovodnoi akvakul'tury [Urgent problems of fresh water aquaculture]*. Moscow, 2000, vol. 75, pp. 125–131 (in Russian).

6. Artamonova T. I., Panov V. E., Esavkin V. E. Some features of formation of morphological structures of the body of two-year carp in relation to its growth. *Voprosy fiziologii i kormleniya ryb [Problems of fish physiology and feeding]*. St. Petersburg, 1999, vol. 74, pp. 169–176 (in Russian).
7. Tarazevich E. V., Kniga M. V., Prokhorchik G. A., Chimbur I. V., Us A. P., Dudarenko L. S., Vashkevich L. M., Tentevitskaya L. S. Fishery characteristic of repair of selected carp families. *Voprosy rybnogo khozyaistva Belarusi = Belarus Fish Industry Problems*. Minsk, 2002, vol. 18, pp. 105–110 (in Russian).
8. Chutaeva A. I., Prokhorchik G. A., Bashunova N. N., Tarazevich E. V., Semenov A. P., Kniga M. V., Chimbur I. V., Ekel'chik R. Z., Dudarenko L. S., Vashkevich L. M., Us A. P. Fish-biological and biochemical-genetic features of carp breeding in the Republic of Belarus. *Voprosy rybnogo khozyaistva Belarusi = Belarus Fish Industry Problems*. Minsk, 1997, vol. 15, pp. 11–33 (in Russian).
9. Tarazevich E. V., Chutaeva A. I., Kniga M. V., Chimbur I. V., Us A. P., Vashkevich L. M. Reproducibility of Belarusian selection carp, imported breeds and different crosses. *Voprosy rybnogo khozyaistva Belarusi = Belarus Fish Industry Problems*. Minsk, 2001, vol. 17, pp. 65–73 (in Russian).
10. Kniga M. V., Tarazevich E. V., Prokhorchik G. A. Assessment of manifestation of the heterotic effect through the fish-biological effect of three-way crosses. *Voprosy rybnogo khozyaistva Belarusi = Belarus Fish Industry Problems*. Minsk, 2004, vol. 20, pp. 94–103 (in Russian).
11. Konchits V. V. Modern problems of development of the aquaculture of Belarus and the ways of their resolution. *Akvakultura nachala XXI veka: istoki, sostoyanie, strategiya razvitiya [Aquaculture at the beginning of XXI century: origin, state, development strategy]*. Moscow, 2002, pp. 43–46 (in Russian).
12. Profir'ev I. A. Metabolism and productivity. *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya [Agricultural Biology]*, 2001, no. 2, pp. 27–41 (in Russian).
13. Tomilenko V. G., Grechkovskaya A. I. Nutritional value of local and hybrid carp. *Rybnoe khozyaistvo [Fisheries]*, 1967, vol. 4, pp. 62–64 (in Russian).
14. Elliot J. The Energetics of Feeding, Metabolism and Growth of Brown Trout (*Salmo trutta* L.) in Relation to Body Weight, Water Temperature and Ration Size. *Journal of Animal Ecology*, 1976, vol. 45, no. 3, pp. 923–948. <https://doi.org/10.2307/3590>
15. Stroganov N. S. Environmental role in the constructive metabolism of fish. *Obmen veshchestv i biokhimiya ryb [Fish metabolism and biochemistry]*. Moscow, 1967, pp. 23–30 (in Russian).
16. Tarazevich E. V., Kniga M. V., Semenov A. P., Shumak V. V. Problem of carp gene pool preservation in the Republic of Belarus. *Problemy intensifikatsii proizvodstva produktov zhivotnovodstva [Problems of intensification of livestock product production]*. Zhodino, 2008, pp. 118–119 (in Russian).
17. Tarazevich E. V., Vashkevich L. M., Tentevitskaya L. S., Semenov A. P., Sazanov V. B., Us V. V., Shumak V. V., Kniga M. V. Comparative characteristic of the nutritional value of groups of Tremlyan carp crosses. *Sostoyanie i perspektivy razvitiya presnovodnoi akvakul'tury [Condition and perspective of freshwater aquaculture development]*. Moscow, VNIIR, 2013, pp. 473–477 (in Russian).
18. Ivanov A. P. *Chemical analysis of fish and food*. Moscow, Rybnoe khozyaistvo Publ., 1963. 36 p. (in Russian).
19. Rokitskii P. F. *Biological statistics*. Minsk, Vysheishaya shkola Publ., 1973, pp. 24–53 (in Russian).
20. Slutskii E. S. Phenotypic change of fish (selection aspect). *Izvestiya Gosudarstvennogo nauchno-issledovatel'skogo instituta ozer'nogo i rechnogo rybnogo khozyaistva [Bulletin of the State Research Institute of Lake and River Fisheries]*, 1978, vol. 134, pp. 3–132 (in Russian).
21. Tarazevich E. V., Prokhorchik G. A., Kniga M. V., Us A. P., Dudarenko L. S., Semenov A. P., Sazanov V. B., Vashkevich L. M. To the definition of the fishery value of individual fish groups by the method of ranking. *Voprosy rybnogo khozyaistva Belarusi = Belarus Fish Industry Problems*. Minsk, 2005, vol. 21, pp. 45–55 (in Russian).

Информация об авторах

Шейко Ярослав Иванович – канд. биол. наук, заведующий лабораторией. Институт рыбного хозяйства (ул. Стебенева, 22, 220024, Минск, Республика Беларусь). E-mail: belniirh@tut.by.

Жмойдяк Дарья Александровна – мл. науч. сотрудник. Институт рыбного хозяйства (ул. Стебенева, 22, 220024, Минск, Республика Беларусь). E-mail: belniirh@tut.by.

Information about the authors

Sheiko Yaroslav Ivanovich – Ph. D. (Biology), Head of the Laboratory. Fish Industry Institute (22, Stebenev Str., 220024, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: belniirh@tut.by.

Zhmoidyak Daria Aleksandrovna – Junior researcher. Fish Industry Institute (22, Stebenev Str., 220024, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: belniirh@tut.by.